

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การเตรียมและการปรับปรุงสมบัติของ  
เทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวเจ้าด้วย  
เส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ



T107906

นางสาวบุษยรัตน์ พัฒนพงษ์อนันต์  
นางสาวประภาวดี เกตุสุดา  
นางสาววีรยา ธรรมมิกะ

นศ.  
นศ.  
นศ.

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 107906  
วันเดือนปี..... - 8 ส.ค. 2553

b. 12213093  
i. ....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาเคมีอุตสาหกรรม  
ภาควิชาเคมี  
คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Preparation and Modification of Thermoplastic Rice  
Starch by Cotton Fibers and Low-Density Polyethylene



A Special Project Submitted in Partial of the Requirement for the Degree  
of Bachelor of Science

Department of Chemistry

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Academic Year 2007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**โครงการพิเศษ** การเตรียมและการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งข้าวเจ้าด้วยเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

**นักศึกษา** นางสาวบุษยรัตน์ พัฒนพงษ์อนันต์ รหัส 47050071  
 นางสาวประภาวดี เกตุสุดา รหัส 47050072  
 นางสาววีรยา ธรรมมีกะ รหัส 47050090

**ภาควิชา** เคมี

**สาขาวิชา** เคมีอุตสาหกรรม

**ปีการศึกษา** 2550

**อาจารย์ที่ปรึกษา** รศ. ดร. จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ			ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ	รศ. ดร. มาลินี ชัยศุภกิจสินธุ์		
กรรมการ	รศ. ดร. สมศักดิ์ วรมงคลชัย		
กรรมการ	รศ. ดร. จุฑารัตน์ ปรัชญาวรากร		

  
 ( ผศ.ดร.ชลช จารุสุทธิรักษ์ )

หัวหน้าภาควิชาเคมี

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>โครงการพิเศษ</b>	การเตรียมและการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้าด้วยเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ		
<b>นักศึกษา</b>	นางสาวบุษยรัตน์	พัฒนพงษ์อนันต์	รหัส 47050071
	นางสาวประภาวดี	เกตสุดา	รหัส 47050072
	นางสาววีรยา	ธรรมมิกะ	รหัส 47050090
<b>ภาควิชา</b>	เคมี		
<b>สาขาวิชา</b>	เคมีอุตสาหกรรม		
<b>ปีการศึกษา</b>	2550		
<b>อาจารย์ที่ปรึกษา</b>	รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรีชญาวรรณ		

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งศึกษาเกี่ยวกับการเตรียมและปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch, TPS) จากแป้งข้าวเจ้าโดยใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ เพื่อเตรียมพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ โดยแบ่งงานวิจัยออกเป็น 2 ขั้นตอน เริ่มจากการหาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้า โดยทำการผสมแป้งข้าวเจ้ากับกลีเซอรอลด้วยเครื่องผสมความเร็วสูง (High-speed mixer) จากนั้นนำไปผสมสูตรด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) ที่อุณหภูมิและความเร็วรอบต่าง ๆ จากนั้นนำไปขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression molding) ซึ่งเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้าในสูตรที่มีการผสมที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 40 รอบต่อนาที มีสมบัติเชิงกลสูงที่สุด จึงถูกเลือกให้เป็นภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้า สำหรับขั้นตอนที่สองเป็นขั้นตอนการดัดแปรเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเพื่อปรับปรุงสมบัติโดยการเสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้าย และ/หรือการเติมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยทำการผสมเป็นอัตราส่วนระหว่างเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในอัตราส่วน 1:0 0:1 1:1 1:2 และ 2:1 ด้วยวิธีการขึ้นรูปและภาวะการเตรียมที่เหมาะสมที่ได้จากขั้นตอนแรก จากนั้นทำการทดสอบสมบัติต่างๆ พบว่าสมบัติเชิงกลมีค่าสูงสุดเมื่อทำการปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในอัตราส่วน 2:1 จากผลการทดลองพบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชในสูตรที่มีการปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในอัตราส่วน 1:0 มีค่าสูงสุด แต่ที่อัตราส่วน 0:1 มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำต่ำที่สุด ส่วนฐานฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชในแต่ละสูตรเมื่อศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงให้เห็นว่าเส้นใยฝ้ายมีการกระจายตัวที่ดีและสามารถเข้ากับเมทริกซ์ได้ดีกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และยัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าเทอร์โมพลาสติกสไตรีนในสูตรที่ไม่มีการปรับปรุง มีแนวโน้มในการย่อยสลายเร็วที่สุด แต่สูตรที่มีการปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในอัตราส่วน 0:1 ใช้เวลาในการย่อยสลายนานที่สุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Special Project</b>	Preparation and Modification of Thermoplastic rice starch by Cotton fibers and Low-density polyethylene		
<b>Name</b>	Miss.Busayarat	Pattanaponganun	ID 47050071
	Miss.Prapawadee	Gatesuda	ID 47050072
	Miss.Weeraya	Thammiga	ID 47050090
<b>Department</b>	Chemistry		
<b>Program</b>	Industrial chemistry		
<b>Academic Year</b>	2007		
<b>Special Project Advisor</b>	Asso.Prof.Dr.Jutarat Prachayawarakorn		

### Abstract

This research aimed to study on the preparation and modification of thermoplastic rice starch (TPS) plasticized by glycerol in order to produce degradable polymer. The experimental procedure was divided into 2 steps. Step 1, the optimum condition for the preparation of TPS was determined. Rice starch and glycerol were firstly mixed using high-speed mixer, then it was compounded using internal mixer at the different temperatures and speeds. The specimens were shaped using compression molding. It was found that the temperature of 170°C and the speed of 40 rpm were the suitable condition leading to maximum mechanical properties. Step 2, the TPS specimens were modified by reinforcing with cotton fibers and/or by adding low-density polyethylene (LDPE). The different ratios of cotton fiber : LDPE were studied, i.e. 1:0 0:1 1:0 0:1 1:1 1:2 and 2:1. The result showed that the ratio of 2:1 exhibited the maximum mechanical properties. In addition, the specimens at the ratio of 1:0 and 0:1 presented the highest and lowest percentage of water absorption, respectively. Besides, morphology of the specimens from Scanning Electron Microscope (SEM) illustrated that cotton fiber was well distributed and compatible with the matrix when compared with LDPE. Furthermore, the TPS with no modification was easily degrade while the specimen at the ratio of 0:1 was the most difficult to degrade.

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.จุฑารัตน์ ปรัชญารวากร ที่เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษนี้ ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำเกี่ยวกับโครงการวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. มาลินี ชัยศุกกิจศิลป์ และ รศ.ดร. สมศักดิ์ วรมงคลชัย ที่กรุณาเป็นกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษโดยช่วยกรุณาตรวจทาน และแก้ไขโครงการพิเศษฉบับนี้ให้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ คุณกฤษณะ เกษประดิษฐ์ และ คุณสุดใจ สอนสะอาด เจ้าหน้าที่อาคาร ฝึกงานทางอุตสาหกรรมเคมีและพอลิเมอร์ที่คอยอำนวยความสะดวกและให้ความช่วยเหลือตลอดการดำเนินงานวิจัยนี้

นอกจากนี้ยังขอขอบคุณบุคคลท่านอื่นๆ ที่ให้ความกรุณาช่วยเหลือ ซึ่งผู้จัดทำมิได้กล่าวถึง ทางผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

บุษยรัตน์

พัฒนพงษ์อนันต์

ประภาวดี

เกตุสุดา

วีรยา

ธรรมมิกะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อโครงการพิเศษภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อโครงการพิเศษภาษาอังกฤษ.....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	ง
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญรูป.....	ช
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	4
2.1 พลาสติที่ย่อยสลายได้.....	4
2.1.1 การย่อยสลายของพลาสติก.....	4
2.1.2 เทคโนโลยีพลาสติกจากแป้ง.....	6
2.1.2.1 การใช้สารพอลิเมอร์ธรรมชาติ (แป้ง) เป็นองค์ประกอบหลัก.....	6
2.1.2.2 แป้งผสมพอลิเมอร์ย่อยสลายได้.....	6
2.1.2.3 แป้งกราฟท์โคพอลิเมอร์.....	9
2.1.3 วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลาย.....	9
2.1.3.1 การวิเคราะห์สมมูลคาร์บอน.....	9
2.1.3.2 การวิเคราะห์น้ำหนักที่หายไป.....	10
2.1.3.3 การวิเคราะห์ลักษณะจากกล้องจุลทรรศน์.....	10
2.1.3.4 การวิเคราะห์ด้วยสเปกโทรสโคปีชนิดแสงอินฟราเรด.....	11
2.1.3.5 การวิเคราะห์ด้วยความร้อน.....	11
2.1.3.6 การทดสอบโดยการฝังดิน.....	11
2.2 แป้ง.....	12
2.2.1 องค์ประกอบภายในแป้ง.....	12
2.2.2 โครงสร้างและการรวมตัวเป็นเม็ดแป้ง.....	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญ(ต่อ)

	หน้า
2.2.3 สมบัติของแป้ง.....	19
2.3.3.1 การดูดซับน้ำ การพองตัวและการละลาย.....	19
2.3.3.2 การเกิดเจลลาทีนเซชัน.....	19
2.3.3.3 การเกิดรีโทรเกรเดชัน .....	20
2.2.4 แป้งข้าวเจ้า.....	22
2.2.5 แป้งในรูปเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช .....	24
2.3 พลาสติกไซเซออร์.....	25
2.3.1 พลาสติกไซเซชันและพลาสติกไซเซออร์ .....	25
2.4 เส้นใย.....	26
2.4.1 เส้นใยฝ้าย .....	26
2.4.1.1 ลักษณะการจัดเรียงตัวภายในเส้นใย.....	27
2.4.1.2 องค์ประกอบทางเคมี.....	28
2.4.1.3 สมบัติทางกายภาพ.....	28
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	31
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย.....	37
3.1 สารเคมีและวัสดุที่ใช้ในการวิจัย.....	37
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	38
3.3 วิธีการทดลอง.....	40
3.4 วิธีการทดสอบ.....	42
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	45
4.1 สมบัติเชิงกล.....	45
4.1.1 การศึกษาผลของอุณหภูมิและความเร็วรอบที่เหมาะสมในการผสม.....	45
4.1.2 ศึกษาการปรับปรุงสมบัติ โดยใช้เส้นใยฝ้ายเป็นส่วนเสริมแรง.....	48
4.1.3 ศึกษาการปรับปรุงสมบัติ โดยใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ.....	51
4.1.4 ศึกษาการปรับปรุงสมบัติ โดยใช้เส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ.....	53
4.2 การย่อยสลายโดยการฝังดิน.....	55
4.3 การดูดซับน้ำ.....	62

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.4 สันฐานวิทยา.....	64
4.4.1 เทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งข้าว ขึ้นรูปที่ 170°C / 40 rpm.....	65
4.4.2 เทอร์โมพลาสติกสตาโรล โดยใช้เส้นใยฝ้ายเป็นส่วนเสริมแรง.....	66
4.4.3 เทอร์โมพลาสติกสตาโรลปรับปรุงสมบัติด้วยพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นต่ำ.....	67
4.4.4 เทอร์โมพลาสติกสตาโรลปรับปรุงสมบัติโดยใช้เส้น ใยฝ้ายและ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำร่วมกัน เท่ากับ 1:1.....	68
4.4.5 เทอร์โมพลาสติกสตาโรลปรับปรุงสมบัติโดยใช้เส้น ใยฝ้ายและ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำร่วมกัน เท่ากับ 1:2.....	69
4.4.6 เทอร์โมพลาสติกสตาโรลปรับปรุงสมบัติโดยใช้เส้น ใยฝ้ายและ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำร่วมกัน เท่ากับ 2:1.....	70
4.5 สมบัติด้านความร้อน.....	71
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	75
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	75
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	76
เอกสารอ้างอิง.....	71
ภาคผนวก.....	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญัตราสาร

	หน้า
ตารางที่ 2.1	สมบัติที่สำคัญของอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน.....13
ตารางที่ 2.2	สมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลส.....14
ตารางที่ 2.3	สมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลเพกทิน.....16
ตารางที่ 2.4	อัตราการคั่นตัวของแป้งแต่ละชนิด.....22
ตารางที่ 2.5	องค์ประกอบภายในเมล็ดข้าวหัก.....22
ตารางที่ 2.6	สมบัติของแป้งข้าวเจ้า.....24
ตารางที่ 2.7	สมบัติของเส้นใยฝ้าย.....29
ตารางที่ 3.1	สมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เกรด LD1905F จากบริษัทไทยโพลีเอทิลีน จำกัด.....37
ตารางที่ 3.3	อัตราส่วนของแป้ง กลีเซอรอล และกรดสเตียริกที่ใช้ในการเตรียม เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช.....40
ตารางที่ 3.4	แสดงมาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ที่เตรียมได้.....42
ตารางที่ 4.1	ผลการย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเมื่อผสมด้วยเส้นใยฝ้ายและ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำร่วมกัน.....61
ตารางที่ 4.2	น้ำหนักของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงเมื่อทำการทดสอบการดูดซับน้ำ เป็นเวลา 5 วัน.....62
ตารางที่ 4.3	อุณหภูมิการสลายตัวของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเมื่อผสมด้วยเส้นใยฝ้ายและ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำร่วมกัน.....73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ขั้นตอนต่าง ๆ ในการย่อยสลายพอลิเมอร์.....	6
2.2 การย่อยสลายแป้งผสมพอลิเมอร์ย่อยสลายได้.....	8
2.3 การผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ที่ใช้แป้งในรูปเม็ดแป้ง.....	8
2.4 การผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ที่ใช้แป้งในรูปเจลาตินอส.....	9
2.5 โครงสร้างของสตาร์ชกราฟท์โคพอลิเมอร์.....	10
2.6 โครงสร้างทางเคมีของแป้ง.....	14
2.7 โครงสร้างของอะมิโลส.....	14
2.8 โครงสร้างของอะมิโลเพกทิน.....	16
2.9 ขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้งชนิดต่าง ๆ เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดา.....	18
2.10 ขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้งชนิดต่าง ๆ เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอน.....	19
2.11 การเกิดรีโทรเกรเดชัน.....	22
2.12 กลไกการคืนตัวของแป้ง.....	22
2.13 แผนภาพกระบวนการผลิตแป้งสตาร์ชข้าวเจ้า.....	24
2.14 ดันฝ้าย และเมล็ดฝ้าย.....	28
2.15 การเก็บเกี่ยวฝ้าย.....	28
4.1 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้าที่อุณหภูมิและความเร็วรอบต่าง ๆ.....	46
4.2 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ทำการผสมด้วยเส้นใยฝ้าย.....	48
4.3 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ทำการผสมด้วยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ.....	51
4.4 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ทำการผสมด้วยเส้นใยฝ้าย และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ.....	53
4.5 การย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชผสมที่อุณหภูมิ 170 °C และความเร็วรอบ 40 รอบ/นาที.....	55
4.6 การย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชผสมด้วยเส้นใยฝ้าย 5% โดยน้ำหนัก.....	56
4.7 การย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชผสมด้วยพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นต่ำ 5% โดยน้ำหนัก.....	57
4.8 การย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชผสมด้วยเส้นใยฝ้ายและ พอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นต่ำในอัตราส่วนเท่ากับ 1:1.....	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูปรภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 การย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลผสมด้วยเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นต่ำในอัตราส่วน เท่ากับ 1:2.....	59
4.10 การย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลผสมด้วยเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นต่ำในอัตราส่วน เท่ากับ 2:1.....	60
4.11 เทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งข้าวเจ้า ที่อุณหภูมิ 170 °C ความเร็วรอบ 40 rpm เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	65
4.12 เทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งข้าวเจ้าเสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้าย 5 % เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	66
4.13 เทอร์โมพลาสติกสตาโรล จากแป้งข้าวเจ้าผสมด้วย LDPE 5 % เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	67
4.14 เทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งข้าวเจ้าผสมด้วยเส้นใยฝ้าย : LDPE อัตราส่วน 1: 1 เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	68
4.15 เทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งข้าวเจ้าผสมด้วยเส้นใยฝ้าย : LDPE อัตราส่วน 1:2 เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	69
4.16 เทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งข้าวเจ้าผสมด้วยเส้นใยฝ้าย : LDPE อัตราส่วน 2:1 เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	70
4.17 (ก) TGA และ (ข) DTG ของ (1) เทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งข้าวเจ้า (2) เทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งข้าวเจ้าผสมด้วยเส้นใยฝ้าย (3) เทอร์โมพลาสติกสตาโรล จากแป้งข้าวเจ้า ผสมด้วยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (4) เทอร์โมพลาสติกสตาโรล จากแป้งข้าวเจ้าผสมด้วยเส้นใยฝ้าย : พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เท่ากับ 1.1.....	71
4.18 (ก) TGA และ (ข) DTG ของ (1) เทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งข้าวเจ้า ผสมด้วยเส้นใยฝ้าย : พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เท่ากับ 1:1 (2) เทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งข้าวเจ้าผสมด้วยเส้นใยฝ้าย : พอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นต่ำ เท่ากับ 1:2 (3) เทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งข้าวเจ้า ผสมด้วยเส้นใยฝ้าย : พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เท่ากับ 2:1 .....	72

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

สภาวะโลกร้อน (Global Warming) กำลังทวีความรุนแรงขึ้นอย่างต่อเนื่อง การคิดค้นวิธีการแก้ปัญหาสภาวะโลกร้อนจึงเป็นสิ่งที่ควรตระหนักอย่างมากในปัจจุบัน และการคิดค้นสิ่งที่สามารถนำมาใช้ทดแทนเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อโลกของเรานั้นก็เป็นทางเลือกหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจอยู่ในขณะนี้ เทอร์โมพลาสติก (Thermoplastics) เป็นพอลิเมอร์สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ (Recycle) แต่การนำเทอร์โมพลาสติกกลับมาใช้ใหม่จำเป็นต้องใช้กรรมวิธีที่ยุ่งยาก อีกทั้งเทอร์โมพลาสติกยังเป็นพอลิเมอร์ที่ใช้เวลาในการย่อยสลายค่อนข้างนานอันเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดขยะพอลิเมอร์ในปริมาณที่สูงขึ้นเรื่อย ๆ

แนวทางหนึ่งในการแก้ไขปัญหาสภาวะจากพลาสติก คือ การใช้พลาสติกที่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากแสงหรือกระบวนการทางชีวภาพ พอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ (Degradable polymer) เป็นพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์มาจากวัสดุธรรมชาติ (Natural materials) ซึ่งสามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติโดยใช้เวลาในการย่อยสลายสั้นกว่าพอลิเมอร์ชนิดอื่น ๆ ทั่วไป ความสนใจในการพัฒนาผลิตภัณฑ์พลาสติกที่ย่อยสลายได้เกิดขึ้นมาอย่างต่อเนื่อง ผลิตภัณฑ์หนึ่งที่มีความสนใจในการศึกษาอย่างมาก คือ แป้ง (Starch) ซึ่งเป็นพอลิแซคคาไรด์ที่ได้มาจากผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร แป้งเป็นวัสดุที่มีราคาถูก หาได้ง่ายและย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ

เนื่องจากในประเทศไทยมีข้าวเป็นสินค้าส่งออกอันดับ 1 ของโลกตั้งแต่ปี พ.ศ. 2524 จนถึงปัจจุบัน จากรายงานของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรพบว่าในปี พ.ศ. 2548 และ 2549 ประเทศไทยมีผลผลิตข้าวเปลือก 30.29 และ 29.43 ล้านตันและได้ส่งออกข้าวในปริมาณ 7.54 และ 7.41 ล้านตันตามลำดับ [1] แป้งข้าวเจ้าเป็นอีกผลิตภัณฑ์หนึ่งที่เป็นผลิตภัณฑ์หลักที่ได้มาจากข้าว จากการสำรวจของบริษัทผู้ผลิตแป้งข้าวเจ้าส่งออก พบว่าประมาณ 70-80% ของปริมาณการผลิตแป้งข้าวเจ้าจะส่งออกจำหน่ายต่างประเทศ และส่วนที่เหลือจะจำหน่ายเพื่อการบริโภคในประเทศ โดยส่วนมากตลาดในประเทศนิยมใช้แป้งข้าวเจ้าในการทอด การเตรียมแป้งข้าวเจ้าทำได้โดยการใช้ข้าวหักหรือข้าวแห้งมาผ่านการโม่ซึ่งอาจเป็นการโม่แป้ง โม่น้ำหรือวิธีผสม [1]

นอกจากนี้เส้นใยธรรมชาติ (Natural fibers) ยังเป็นวัสดุที่ได้จากธรรมชาติซึ่งสามารถย่อยสลายได้ เส้นใยธรรมชาติเป็นเส้นใยที่ได้จากพืช สัตว์และแร่ธาตุ ตัวอย่างเช่น ป่าน (Flax) ปอกระเจา (Jute) เส้นใยไม้ (Wood fibers) เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วเส้นใยธรรมชาติมีความเหมาะสมในการใช้เป็นสารเสริมแรงเนื่องจากมีความแข็งแรงสูงและมีความหนาแน่นต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การนำพลาสติกหรือพอลิเมอร์มาผสมกับแป้งจะทำให้ได้พอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ แต่พอลิเมอร์ที่ได้จะมีสมบัติเชิงกลที่ลดลงอย่างชัดเจน การนำเส้นใยธรรมชาติมาเสริมแรงให้กับพอลิเมอร์ผสมแป้งจึงเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจเพื่อผลิตพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้และช่วยทำให้มีสมบัติเชิงกลที่ดีกว่าสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์ที่ผสมแป้งอีกด้วย

ในโครงการวิจัยนี้จึงเลือกที่จะศึกษาเกี่ยวกับการขึ้นรูปและการทดสอบสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch, TPS) ที่เตรียมได้จากแป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอลนำมาผสมกับพอลิเอทิลีน (Polyethylene, PE) เพื่อให้พอลิเมอร์ย่อยสลายได้ และศึกษาถึงการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชผสมพอลิเอทิลีน โดยการเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ ซึ่งคาดว่าชิ้นงานที่เตรียมได้จะมีสมบัติเชิงกลใกล้เคียงกับพอลิเมอร์สังเคราะห์แต่สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อเตรียมพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้จากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้า (Thermoplastic rice starch) โดยมีกลีเซอรอล (Glycerol) เป็นพลาสติกไซเซอร์
- 1.2.2 ศึกษาแนวทางการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชโดยการเสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้าย (Cotton fibers) และการใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE)

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 เพื่อเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้า โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์
- 1.3.2 ศึกษาหาปริมาณแป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอลที่มีผลต่อสมบัติต่าง ๆ ของพอลิเมอร์ที่เตรียมได้
- 1.3.3 ศึกษาหาสภาวะการทดลองที่เหมาะสมในการผสมวัตถุดิบเข้าด้วยกัน ได้แก่ อุณหภูมิและความเร็วรอบในการผสม
- 1.3.4 ศึกษาแนวทางในการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช โดยใช้เส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ
- 1.3.5 เพื่อทดสอบสมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ สันฐานวิทยา สมบัติทางความร้อน และสมบัติการย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถเตรียมพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้จากแป้งข้าวเจ้าที่มีสมบัติใกล้เคียงกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ใช้งานกันทั่วไปได้
- 1.4.2 ช่วยลดปัญหาสภาวะโลกร้อนในยุคปัจจุบันและอนาคตได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

#### 2.1 พลาสติกย่อยสลายได้

ปัจจุบันปัญหาของการใช้พลาสติกมีมากขึ้น ทั้งนี้เพราะพลาสติกส่วนใหญ่มีความคงทนต่อการย่อยสลาย ใช้เวลานานร้อยปีจนกว่าจะมีการสูญเสียน้ำหนักบางส่วน การนำไปทำลายได้โดยการเผาจะให้ก๊าซที่เป็นพิษและมีความร้อนสูง และถ้านำไปทิ้งในมหาสมุทรจะก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตในทะเล การนำกลับมาใช้ใหม่ (Recycle) ทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับการเก็บรวบรวมและค่าขนส่ง ซึ่งปริมาณการใช้พลาสติกมีตัวเลขที่เพิ่มมากขึ้นอย่างมาก ถ้าไม่มีการใช้วัสดุที่ย่อยสลายได้มาทดแทน พลาสติกที่ใช้ทั้งหมดในโลกประมาณว่ามีจำนวนกว่า 100 ล้านตัน จะเห็นว่าถ้าสามารถทดแทน การใช้วัสดุภัณฑ์เหล่านี้เพียง 1% จะเป็นตัวเลขถึง 1 ล้านตัน แป้งจึงเป็นวัสดุที่น่าสนใจในการนำมาเป็นวัสดุใช้ทดแทนพลาสติกในบางส่วนของการใช้งาน เนื่องจากแป้งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติ ย่อยสลายได้ง่าย มีมากเป็นอันดับสองรองจากเซลลูโลส สามารถพองตัวขึ้นแผ่นฟิล์มได้ รวมทั้งมีลักษณะที่เปลี่ยนรูปได้ นำขึ้นรูปในแม่พิมพ์ได้ ราคาถูก มีความบริสุทธิ์สูง ปัจจุบันได้มีการนำแป้งมาผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ในรูปสารตัวเติม (Filler) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic starch) ในการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ควรเน้นถึงอัตราส่วนของแป้งที่ใช้เป็นองค์ประกอบหลัก

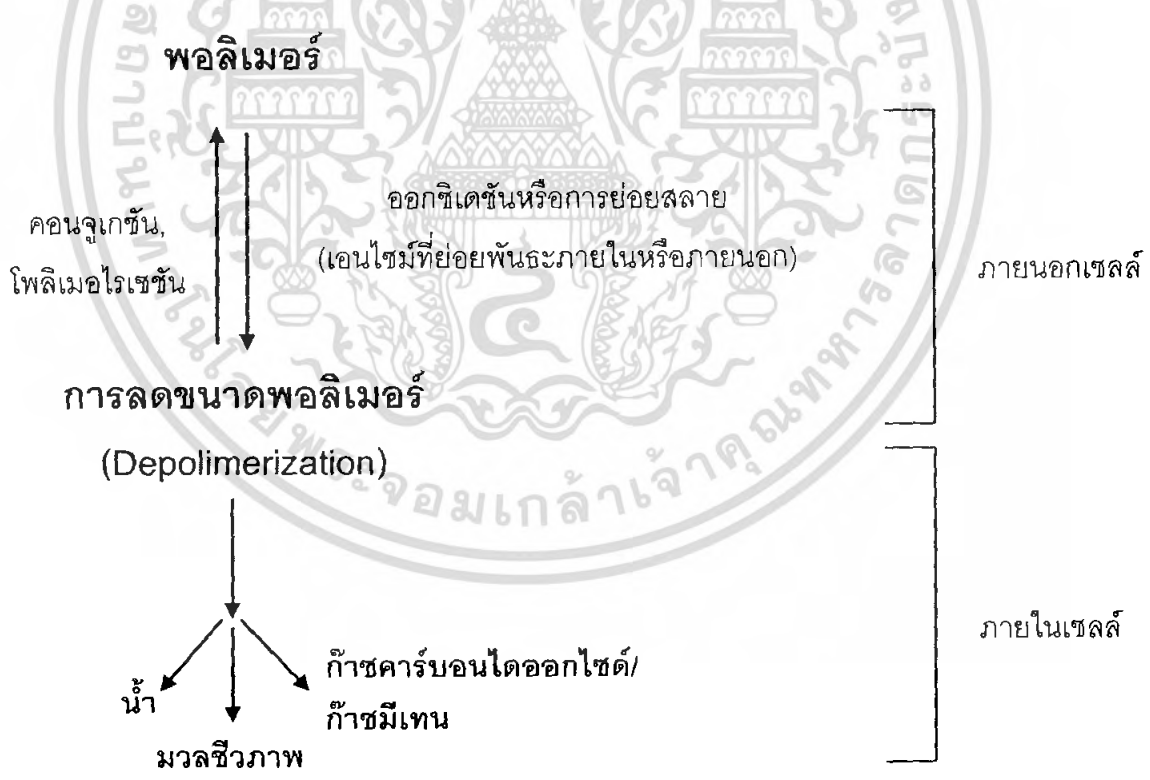
##### 2.1.1 การย่อยสลายของพลาสติก [2]

พลาสติกที่ย่อยสลายได้ (Degradable plastic) หมายถึง พลาสติกที่มีการเปลี่ยนโครงสร้างเคมีเมื่ออยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมเนื่องจากมีสมบัติที่เปลี่ยนไป พลาสติกที่ย่อยสลายได้แบ่งออกได้เป็น 4 ประเภท คือ

1. พลาสติกย่อยสลายได้ด้วยแสง (Photodegradable plastic)
2. พลาสติกย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางเคมีโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidatively degradable plastic)
3. พลาสติกย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางเคมีโดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolytically degradable plastic)
4. พลาสติกย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางชีวภาพ (Biodegradable plastic)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ หมายถึง พลาสติกที่สามารถย่อยสลายให้เป็นโมเลกุลเล็ก ๆ ได้โดยเอนไซม์จากสิ่งมีชีวิต ทั้งในสภาพที่มีอากาศหรือไม่มีอากาศ สารประกอบคาร์บอนที่ได้จะกลับคืนสู่สิ่งแวดล้อม การย่อยสลายเกิดขึ้น 2 ขั้นตอน ขั้นแรกจะเป็นการย่อยสลายให้โมเลกุลแตกออก เรียกว่าขั้น Depolymerization จะเกิดภายนอกสิ่งมีชีวิต (ปกติจะเป็นแบคทีเรียหรือรา) เนื่องจากขนาดและสมบัติที่ไม่ละลายของพอลิเมอร์ จุลินทรีย์จะขับเอนไซม์ออกมาซึ่งจะตัดพอลิเมอร์ทั้งแบบ Endo (ตัดพันธะแบบสุ่ม) และแบบ Exo (ตัดพันธะจากมอนอเมอร์ปลายสุดก่อนอย่างมีลำดับ) จนได้สารประกอบที่เล็กลง จากนั้นจะเข้าสู่ขั้นที่สอง คือ Mineralization สารประกอบที่ได้จากการย่อยจากขั้นแรกจะเข้าสู่เซลล์ จะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานในรูป ATP ก๊าซต่าง ๆ (เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ก๊าซมีเทน (CH<sub>4</sub>) ก๊าซไนโตรเจน (N<sub>2</sub>)) น้ำ เกลือต่าง ๆ และชีวมวล (Biomass) ปฏิกริยาส่วนใหญ่เป็นแบบทั่วไปของกระบวนการย่อยสลาย แต่อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ที่ย่อยสลาย จุลินทรีย์และสิ่งแวดล้อม ตัวอย่างเช่น มีหลายกรณีที่ขั้นแรกสามารถเกิดปฏิกิริยาย้อนกลับได้ จะได้ผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ประสิทธิภาพของการย่อยสลายจะขึ้นอยู่กับชนิดของพอลิเมอร์ ชนิดของจุลินทรีย์และสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ได้แก่ ออกซิเจน ความชื้น และอุณหภูมิ ขั้นตอนการย่อยสลายของพอลิเมอร์แสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนต่าง ๆ ในการย่อยสลายพอลิเมอร์ [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.1.2 เทคโนโลยีพลาสติกจากแป้ง [2]

การพัฒนาพลาสติกย่อยสลายได้มีการพัฒนาเป็นเวลานานแล้วเริ่มตั้งแต่การที่เริ่มใช้พอลิเมอร์ธรรมชาติราคาถูก คือ แป้งผสมในการฉีดพลาสติก และได้รับการพัฒนาจากนักวิทยาศาสตร์อย่างต่อเนื่อง ขณะนี้สามารถแบ่งเทคโนโลยีการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ออกเป็นกลุ่มใหญ่ ๆ ได้ดังนี้

### 2.1.2.1 การใช้พอลิเมอร์ธรรมชาติ (แป้ง) เป็นองค์ประกอบหลัก

กลุ่มนี้จะใช้แป้งทั้งหมดหรือมากกว่า 90% ผลิตภัณฑ์ที่รู้จักจะอยู่รูปที่เรียกว่า Gelatinized starch puff หรือ Plate expanded by extrusion หรือ Baking with water หมายความว่าแป้งเกิดการพองตัวขึ้นเนื่องจากแรงดันของน้ำภายในตัวแป้งเมื่อถูกความร้อนสูงกลายเป็นไอ ลักษณะของผลิตภัณฑ์จะเป็นการทดแทนโฟมที่ทำจากพอลิสไตรีน เรียกกันว่า โฟมแป้ง ใช้ในการรองรับภาชนะกันกระแทกในกล่อง โฟมแป้งแบ่งออกได้เป็น

#### (1) โฟมพลาสติกจากแป้ง

การใช้แป้งเป็นวัตถุดิบอัดด้วยความดันสูงในเครื่องอัดรีด (Extruder) แป้งจะพองออกจากหัวฉีด เนื่องจากสูญเสียความชื้นและลดแรงดัน เมื่อเย็นตัวลงจะมีโครงสร้างแข็ง มีรูพรุนคล้ายโฟมสำหรับอุ้มอากาศ สมบัติของโฟมแป้งนี้ (ความหนาแน่น ความเหนียว) เกิดจากสมบัติของแป้ง ปริมาณน้ำ และชนิดและปริมาณของสารเติมแต่ง (Additive)

#### (2) โฟมจากแป้ง

เป็นการใช้ลักษณะการขยาย (Expansion) ของส่วนผสมจากแป้งและเส้นใย เช่น เยื่อ (Pulp) เพื่อสร้างความแข็งแรงของผลิตภัณฑ์เมื่อขึ้นรูปในแม่พิมพ์ เช่น ภาชนะใส่ของ ถ้วย ถาด เป็นต้น

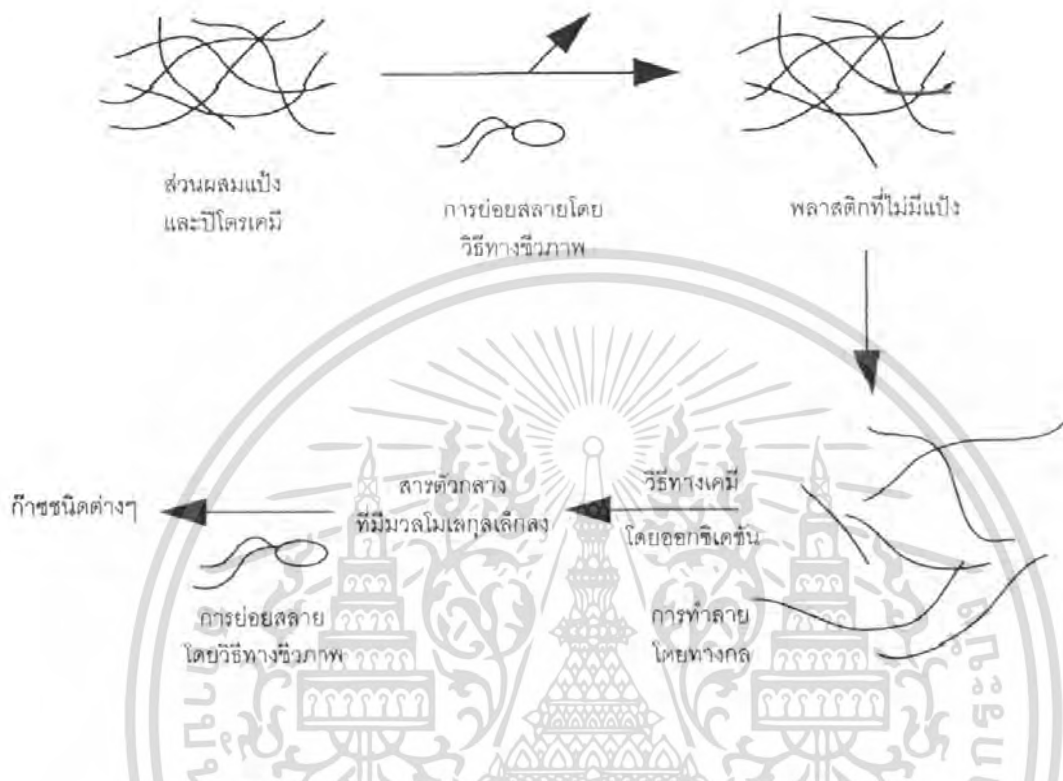
### 2.1.2.2 แป้งผสมพอลิเมอร์ย่อยสลายได้

พลาสติกที่ผลิตได้จากกลุ่มนี้จะประกอบด้วยส่วนประกอบ 2 ส่วนที่ต่างกัน คือ ส่วนที่เป็นแป้งสามารถย่อยสลายได้ และส่วนที่เป็นพอลิเมอร์อนุพันธ์ของปิโตรเคมี การย่อยสลายแป้งผสมพอลิเมอร์ย่อยสลายได้แสดงดังรูปที่ 2.2 แป้งที่ใช้ในกระบวนการนี้สามารถใช้ได้ 2 รูป คือ ในรูปเม็ดแป้งและแป้งที่ผ่านการเจลาทิไนซ์ อย่างไรก็ตาม พลาสติกที่ได้จากวิธีนี้จุลินทรีย์ไม่สามารถย่อยสลายได้ 100% โดยจุลินทรีย์จะย่อยแป้งที่กระจายอยู่ทั่วพลาสติก เกิดรูพรุน ส่วนที่เป็นพอลิเมอร์อนุพันธ์ของปิโตรเคมีจะถูกทำลายต่อไปด้วยแรงกลหรือปฏิกิริยาเคมี

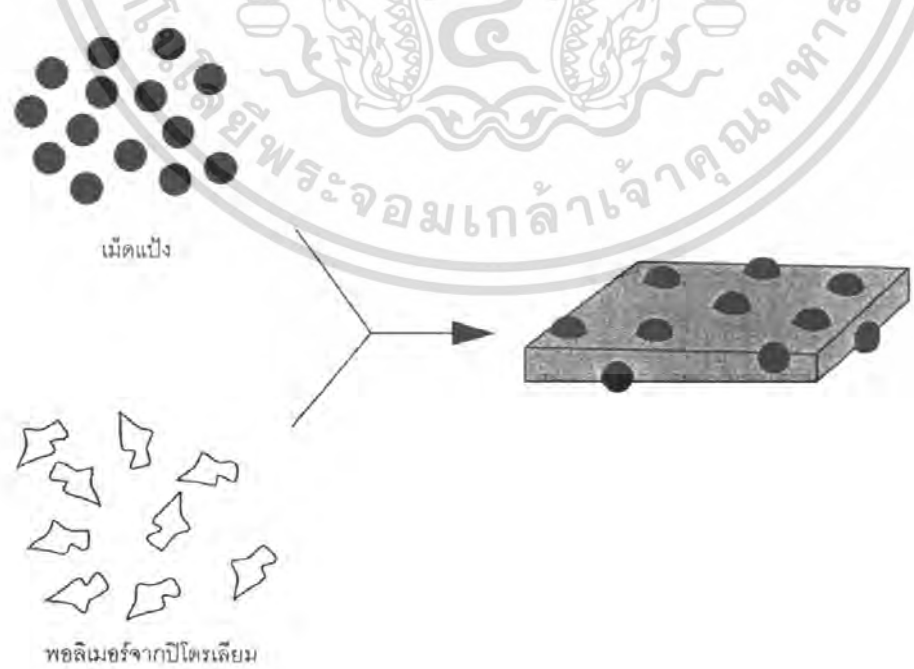
#### (1) ในรูปเม็ดแป้ง

แป้งจะผสมกับพอลิเมอร์อนุพันธ์ของปิโตรเคมี นำไปขึ้นรูปโดยไม่ต้องทำให้เม็ดแป้งแตกออก ปริมาณแป้งที่ใช้ในวิธีนี้ถูกจำกัดไม่ให้เกิน 10% และต้องมีความชื้นน้อยกว่า 1% เพื่อป้องกันการเกิดไอน้ำระหว่างกระบวนการอัดรีด อาจมีการใส่สารเติมแต่งอื่นๆ ได้ เช่น ใส่น้ำมันข้าวโพดซึ่งเป็น auto-oxidant เข้าไปในกระบวนการผลิต เพื่อให้ไปทำปฏิกิริยากับเกลือโลหะในดินหรือสิ่งแวดล้อม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนูญาดเห็นาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดอนุภาคลิโธอะไรต์เปอร์ออกไซด์ ซึ่งจะไปย่อยพอลิเมอร์อนุพันธ์ของบีโตรีเคมีให้ได้โพลิโเมอร์ที่เล็กลงเพื่อให้ง่ายต่อการย่อยสลายต่อไป การผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ที่ใช้แป้งในรูปเม็ดแป้งแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 การย่อยสลายแป้งผสมพอลิเมอร์ย่อยสลายได้ [2]

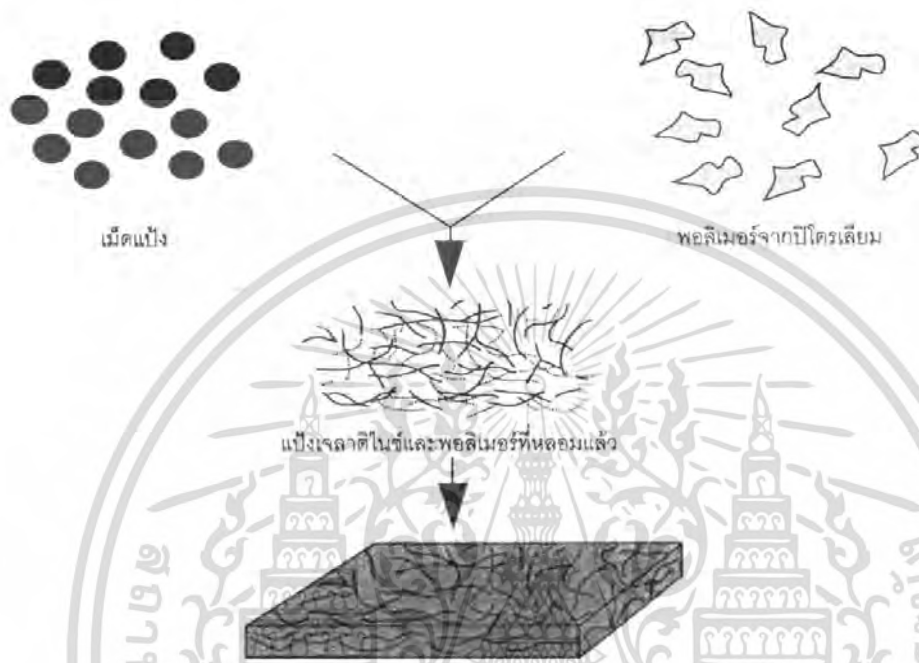


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่รวมไว้สำหรับกรณีใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.3 การผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ที่ใช้แป้งในรูปเม็ดแป้ง [2]

## (2) ในรูปแฉ่งเจลาทีไนท์

วิธีนี้เม็ดแฉ่งจะแตกตัวทั้งหมดผลรวมกับอนุพันธ์ของปีโตรเคมีที่หลอมละลาย กระบวนการผลิตแสดงดังรูปที่ 2.4



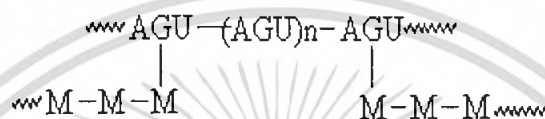
รูปที่ 2.4 การผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ที่ใช้แฉ่งในรูปเจลาทีไนท์ [2]

ในประเทศไทยได้ทดลองผลิตพลาสติกย่อยสลายได้จากส่วนผสมของแฉ่งมันสำปะหลังและพอลิคาโพรแลคแทม โดยแฉ่งมันที่ใช้อยู่ในรูปเม็ดแฉ่งเจลาทีไนท์ ทำการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและความสามารถในการย่อยสลาย ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าสมบัติของส่วนผสมขึ้นอยู่กับสัดส่วนของแฉ่งที่ใช้ เมื่อปริมาณแฉ่งในรูปเม็ดแฉ่งและแฉ่งเจลาทีไนท์ในส่วนผสมต่ำกว่า 40% พบว่าความแข็งแรงดึงของส่วนผสมทั้ง 2 ไม่แตกต่างกัน เพอร์เซ็นต์การดึงยึดขึ้นอยู่กับรูปแฉ่งที่ใช้ถ้าปริมาณแฉ่งมากกว่า 30% ในการทดลองพบว่าในรูปเม็ดแฉ่งมีเปอร์เซ็นต์การดึงยึดสูงกว่าแฉ่งรูปเจลาทีไนท์ถึง 125 เท่าที่ปริมาณแฉ่ง 50% เมื่อตรวจสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (Total Organic Carbon Analyzer) และกล้องจุลทรรศน์ชนิดอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope) พบว่าในรูปแฉ่งเจลาทีไนท์สามารถย่อยสลายได้ง่ายกว่าเนื่องจากมีโครงสร้างลำดับที่น้อยกว่าในรูปเม็ดแฉ่ง เมื่อทำการทดสอบส่วนผสมที่มีอัตราส่วนต่างๆ กัน พบว่าส่วนผสมที่มีแฉ่งเจลาทีไนท์ 30% และ พอลิคาโพรแลคแทม 70% เป็นส่วนผสมที่เหมาะสมในการผลิตพลาสติกที่มีสมบัติทางกายภาพดีและมีความสามารถในการย่อยสลายสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.2.3 แป้งกราฟท์โคพอลิเมอร์

โครงสร้างของแป้งกราฟท์โคพอลิเมอร์ (Starch graft copolymer) แสดงได้ดังรูปที่ 2.5 โดยที่ AGU เป็นหน่วยกลูโคส และ M เป็นมอนอเมอร์ที่จะมาทำปฏิกิริยากับแป้ง แป้งที่ใช้อาจใช้ในรูปของเม็ดแป้งหรือแป้งเจลาทีนซ์ การทำปฏิกิริยากราฟท์โคพอลิเมอร์ไรเซชัน (Graft copolymerization) ขั้นแรกจะต้องทำให้เกิดอนุมูลอิสระ บนสายโมเลกุลของแป้งก่อน ซึ่งมี 2 วิธี คือ โดยวิธีทางเคมีและวิธีฉายรังสี ซึ่งจะใช้วิธีไหนขึ้นกับชนิดของมอนอเมอร์ วิธีทางเคมีเป็นวิธีที่นิยมที่สุด คือ ปฏิกิริยาของแป้งกับเกลือซีริก



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของสตาร์ชกราฟท์โคพอลิเมอร์ [2]

เมื่อเกิดอนุมูลอิสระบนโมเลกุลแป้ง ไฮดรอกซิลของมอนอเมอร์ปิตอร์เคมีตัวแรกจะเข้ามาสร้างพันธะกัน จากนั้นตัวต่อๆ ไปจะเข้ามาต่อกับตัวแรก เป็นเช่นนี้เรื่อย ๆ จนได้กิ่งที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ซึ่งในแป้งแต่ละโมเลกุลจะมีกิ่งก้านจำนวนน้อย

### 2.1.3 วิธีวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลาย [2]

#### 2.1.3.1 การวิเคราะห์สมมูลคาร์บอน

ในการย่อยสลายพอลิเมอร์ของจุลินทรีย์ จะได้พอลิเมอร์คาร์บอนที่อยู่ในรูปที่ละลายได้ (Soluble) ในรูปจุลินทรีย์ (Microbial) และในสภาวะก๊าซ ซึ่งสามารถคำนวณพอลิเมอร์ทั้งหมดที่ถูกย่อยสลายได้จากการเพิ่มปริมาณคาร์บอนในสภาวะดังกล่าว ปริมาณคาร์บอนสามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ใช้การคำนวณหาพื้นที่แห่ง สมมูลมวลของคาร์บอนที่ถูกย่อยสลายสามารถแสดงได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_d = C_g + C_s + C_m$$

เมื่อ  $C_g$  คือ คาร์บอนในสภาวะก๊าซ

$C_s$  คือ คาร์บอนที่ละลายได้

$C_m$  คือ คาร์บอนในรูปจุลินทรีย์

ดังนั้นร้อยละการย่อยสลายได้ของพอลิเมอร์ (%f) สามารถคำนวณได้จาก

$$\%f = \frac{C_d}{C_i} \times 100$$

เมื่อ  $C_i$  คือ คาร์บอนเริ่มต้นในพอลิเมอร์ก่อนการย่อยสลาย

### 2.1.3.2 การวิเคราะห์น้ำหนักที่หายไป

ในการย่อยสลายพอลิเมอร์จะเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ ทำให้เกิดการสูญเสียมวล หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นแร่ธาตุ (Mineralization) ดังนั้นการวิเคราะห์ถึงน้ำหนักของพอลิเมอร์ที่หายไป จะทำให้ทราบถึงระดับการถูกย่อยสลายของพอลิเมอร์ชนิดนั้นๆ โดยพอลิเมอร์ที่มีส่วนผสมของพอลิเอทิลีนกับแป้งในปริมาณสูง จะถูกย่อยสลายได้เร็วกว่าพอลิเมอร์ที่มีส่วนผสมของแป้งปริมาณต่ำ นอกจากนี้วัสดุที่ประกอบด้วยพอลิเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะไม่สามารถถูกย่อยสลายได้ แต่พอลิเอทิลีนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำสามารถถูกย่อยสลายได้ในสภาวะที่มีออกซิเจน

### 2.1.3.3 การวิเคราะห์ลักษณะจากกล้องจุลทรรศน์

(ก) การใช้กล้องจุลทรรศน์

เมื่อสังเกตพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนกับแป้ง ที่ฝังดินเป็นเวลา 6 เดือน ก่อนที่จะล้าง นำมาส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ จะพบเส้นใยของเชื้อราเจริญอยู่บนพอลิเมอร์ และเมื่อนำมาล้าง และสังเกตด้วยกล้องจุลทรรศน์ จะพบรูเล็กๆ ในพอลิเมอร์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแป้งจากพอลิเมอร์ถูกย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์

(ข) การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

SEM ใช้ตรวจสอบลักษณะพื้นผิวโดยใช้กำลังขยายที่สูงมาก โดยจะได้ภาพในลักษณะสามมิติ ซึ่งจะพบว่าพอลิเมอร์ผสมของพอลิเอทิลีนกับแป้งที่ฝังไว้ในดินมีสีที่เปลี่ยนแปลงไป และมีขนาดเล็กลง เนื่องจากมีการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในส่วนที่เป็นแป้ง นอกจากนี้ยังพบว่าชั้นพอลิเมอร์มีจุดดำและเป็นทางสีขาว ซึ่งแสดงว่าแป้งถูกย่อยสลาย เหลือเพียงส่วนของพอลิเอทิลีน นอกจากนี้การใช้ SEM ที่มีกำลังขยายสูงยังสามารถแสดงถึงการสร้างโคไลนของจุลินทรีย์บนพอลิเมอร์ เมื่อนำพอลิเมอร์ที่ฝังดินไว้ 6 เดือนมาตรวจปริมาณไนโตรเจน พบว่าปริมาณไนโตรเจนเพิ่มขึ้นจาก 0.06%

เป็น 0.16% มาจากกรดอะมิโนของจุลินทรีย์ที่ตายอยู่บนพอลิเมอร์ นั่นคือจุลินทรีย์จะเจริญเติบโต เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสร้างโคไลนีนบนพอลิเมอร์ และย่อยสลายส่วนที่เป็นแบ่งบนพอลิเมอร์ โดยจะย่อยสลายพอลิเอทิลีนเพียงเล็กน้อยหรือไม่ย่อยสลายเลย

#### 2.1.3.4 การวิเคราะห์ด้วยสเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด

สเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด (Infrared spectroscopy) เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดลักษณะทางเคมีของวัสดุพอลิเมอร์ ปฏิกริยาส่วนแสงอินฟราเรดของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในพอลิเมอร์จะทำให้เกิดการดูดซับความยาวคลื่นในช่วงดังกล่าวที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของโมเลกุลหรือกลุ่มอะตอมในโมเลกุล ความหนาแน่นของการดูดซับและความยาวคลื่นจะทำให้เกิดแถบสเปกตรัม ซึ่งมีลักษณะของแถบที่เฉพาะตัว ไม่ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทั้งหมดของพอลิเมอร์

สเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณแบ่งที่หายไปในระหว่างการย่อยสลายพอลิเมอร์ นอกจากนี้ขณะที่จุลินทรีย์ย่อยสลายแบ่ง จะเกิดรูขึ้นที่บริเวณพื้นผิวพอลิเมอร์ที่รูเหล่านี้จะมีคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้น ซึ่งสามารถตรวจวัดได้จากสเปกโทรสโกปีชนิดแสงอินฟราเรด

#### 2.1.3.5 การวิเคราะห์ด้วยความร้อน

วิธีวิเคราะห์ด้วยความร้อนมีหลายวิธี ได้แก่ การวิเคราะห์จุดหลอมเหลวผลึก โดย Differential Thermal Analysis (DTA) หรือ Differential Scanning Calorimeter (DSC) การวิเคราะห์น้ำหนักที่สูญเสียโดยใช้ Thermogravimetric Analysis (TGA)

- การศึกษาโดยใช้ DSC พบว่าในระหว่างการย่อยสลาย ลักษณะอสัณฐาน (Amorphocity) ของพอลิเมอร์จะลดลง โดยที่ส่วนอสัณฐานของพอลิเอทิลีนจะถูกย่อยโดยจุลินทรีย์ได้มากกว่าส่วนผลึก
- การศึกษาโดยใช้ TGA เป็นวิธีที่ง่ายและรวดเร็ว ใช้ศึกษาการย่อยสลายแบ่งในพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิเอทิลีนกับแบ่ง โดยใช้วิเคราะห์ปริมาณแบ่งก่อนและหลังการย่อยสลาย

#### 2.1.3.6 การทดสอบโดยการฝังดิน

การทดสอบจะต้องตัดวัสดุที่ต้องการทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 30 x120 มิลลิเมตรหลายๆ ตัวอย่าง ฝังในดินลึกประมาณ 10 เซนติเมตร เมื่อครบกำหนดทุกเดือนให้ขุดตัวอย่างออกมา การทดลองใช้เวลาประมาณ 7 เดือน การเก็บตัวอย่างต้องทำด้วยระมัดระวังเนื่องจากตัวอย่างจะกระจายไปกับดิน ทำการเปรียบเทียบเศษวัสดุที่เหลือเมื่อเวลาต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 แป้ง [2]

“แป้ง” ในการผลิตนั้นหมายถึง คาร์โบไฮเดรต ที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไฮโดรเจนและ ออกซิเจนเป็นส่วนใหญ่ มีสิ่งเจือปน เช่น โปรตีน ไขมัน เกลือแร่ น้อยมาก ส่วนแป้งที่ผลิตโดยทั่วไป ที่ยังมีส่วนประกอบอื่น ๆ อยู่มาก จะเรียกว่า ฟลาวร์ (Flour) ตัวอย่างเช่น แป้งข้าวโพด แป้งสาลี ถ้ายังมีส่วนประกอบของโปรตีนสูง จะจัดอยู่ในประเภทฟลาวร์ เรียกว่า Corn flour , Wheat flour เช่นเดียวกับแป้งข้าวเจ้าที่ยังมีโปรตีน 7 ถึง 8 % เรียกว่า Rice flour แต่เมื่อสิ่งเจือปนอันหมายถึง โปรตีน ไขมัน เกลือแร่อื่น ๆ ถูกสกัดออกไป จนเหลือแป้งบริสุทธิ์เป็นส่วนใหญ่ จึงเรียกว่าเป็นสตาร์ช (Starch) เช่น Corn starch ,Wheat starch เป็นต้น

### 2.2.1 องค์ประกอบภายในแป้ง

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในอัตราส่วน 6:10:5 มีสูตรเคมีโดยทั่วไป คือ  $(C_6H_{10}O_5)_n$  แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส ซึ่งประกอบด้วย Anhydroglucose unit เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ Glucosidic linkage ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 1 ทางด้านตอนปลายของสายพอลิเมอร์มีหน่วยกลูโคสที่มีหมู่แอลดีไฮด์ (Aldehyde group) เรียกว่า Reducing end group แป้งประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ พอลิเมอร์เชิงเส้น (อะมิโลส) และพอลิเมอร์เชิงกิ่ง (อะมิโลเพกทิน) วางตัวในแนวรัศมี แป้งจากแหล่งที่ต่างกันจะมี อัตราส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพกทินแตกต่างกัน (ดังตารางที่ 2.1) ทำให้สมบัติของแป้งแต่ละ ชนิดแตกต่างกัน

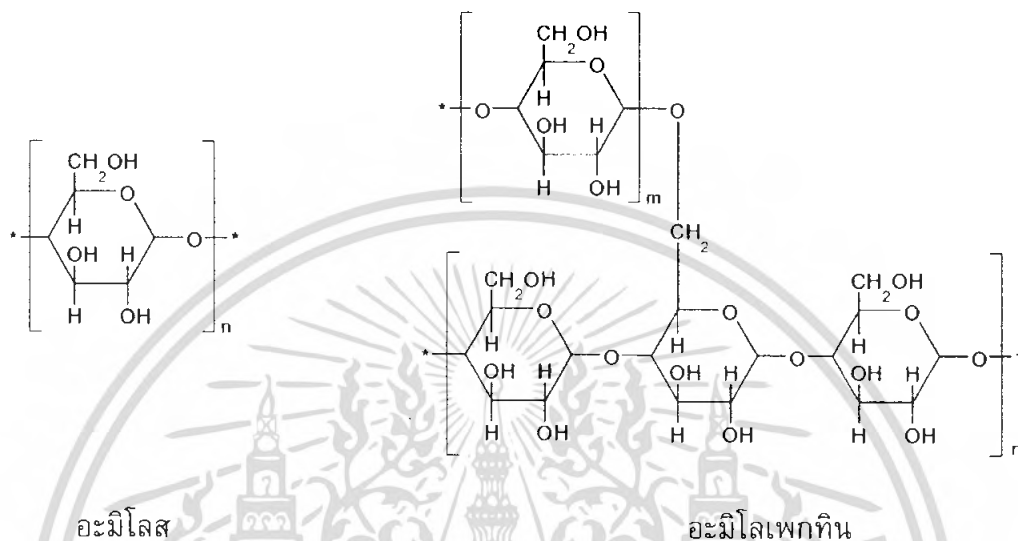
ตารางที่ 2.1 สมบัติที่สำคัญของอะมิโลสและอะมิโลเพกทิน [2]

สมบัติ	อะมิโลส	อะมิโลเพกทิน
ลักษณะโครงสร้าง	สารประกอบของน้ำตาลกลูโคส เกาะกันเป็นเส้นตรง	สารประกอบของน้ำตาลกลูโคส เกาะเป็นกิ่งก้าน
พันธะที่จับ	$\alpha - 1, 4$	$\alpha - 1, 4$ และ $\alpha - 1, 6$
ขนาด	200-2,000 หน่วยกลูโคส	มากกว่า 10000 หน่วยกลูโคส
การละลาย	ละลายน้ำได้น้อยกว่า	ละลายน้ำได้ดีกว่า
การทำปฏิกิริยากับไอโอดีน	สีน้ำเงิน	สีแดงม่วง
การจับตัว	เมื่อให้ความร้อนแล้วทิ้งไว้จะจับตัว เป็นวุ้นและแผ่นแข็ง	ไม่จับตัวเป็นแผ่นแข็ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## องค์ประกอบหลักภายในเม็ดแป้งดังรูปที่ 2.6 ได้แก่

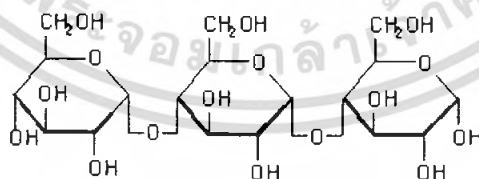
1. อะมิโลส (Amylose)
2. อะมิโลเพกทิน (Amylopectin)
3. สารตัวกลาง (Intermediate material)



รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของแป้ง [2]

### 1. อะมิโลส (amylose)

อะมิโลสเป็นพอลิเมอร์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วยเชื่อมต่อกันกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก (glucosidic linkage) ชนิดแอลฟา-1,4 ( $\alpha-1,4$ ) ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของอะมิโลส [2]

แป้งจากธัญพืช มีปริมาณอะมิโลสสูงประมาณ 28% แป้งจากรากและหัวมีปริมาณอะมิโลสต่ำประมาณ 20% น้ำหนักโมเลกุลของอะมิโลสอยู่ในช่วง  $10^5$  ถึง  $10^6$  ดาลตัน ซึ่งอะมิโลสในแป้งแต่ละชนิดจะมีน้ำหนักโมเลกุลที่แตกต่างกันไป แป้งแต่ละชนิดมีขนาดโมเลกุลหรือระดับขั้นการเกิดพอลิเมอร์ (Degree of polymerization, DP) ของอะมิโลสแตกต่างกัน แป้งที่มีโมเลกุลของเอกลสารนี้เป็นเอกลสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกลสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อะมิโลสยาวขึ้นจะมีแนวโน้มในการเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) ลดลง ในธรรมชาติอะมิโลส มีกิ่งก้านอยู่บ้างแต่ไม่มาก สมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลสของแป้งหลาย ๆ ชนิดแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลส[2]

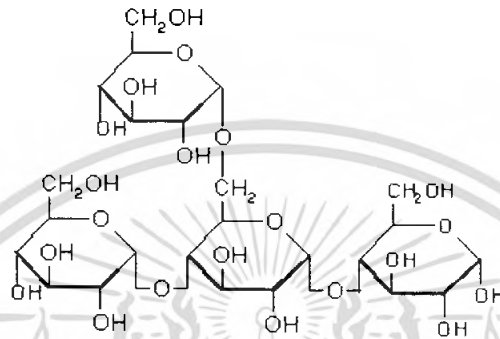
แหล่งแป้ง	ปริมาณ อะมิโลส (%)	$\beta$ - Amylolysis Limit (%)	ขนาด โมเลกุล (DP)เฉลี่ย	จำนวน สายเฉลี่ย (NC)	ความยาว สายเฉลี่ย (CL)	โมเลกุล กิ่ง (%)
แป้งสาลี	28	88	1,300	4.8	270	27
แป้งข้าวโพด	28	82	930	2.7	340	44
แป้งข้าวเจ้า	17					
- อินดิคา		73	1,000	4.0	250	49
- จาโปนิก		81	1,100	3.4	320	31
แป้งมันสำปะหลัง	17	75	2,600	7.6	340	42
แป้งมันฝรั่ง	21	80	4,900	9.5	240	

ตำแหน่งของอะมิโลสภายในเม็ดแป้งขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของแป้ง อะมิโลสบางส่วนอยู่ในกลุ่มของอะมิโลเพกทิน บางส่วนกระจายอยู่ทั้งในส่วนอสัณฐาน (Amorphous) และส่วนผลึก (Crystalline) การศึกษาการเกิดเจลาทีไนซ์ของแป้งมันฝรั่ง พบอะมิโลสในส่วนรอบนอกของเม็ดแป้งมากกว่าที่จะอยู่ในส่วนใจกลางเม็ดแป้ง อะมิโลสที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่จะพบเป็นเกลียวคู่กับอะมิโลเพกทินอยู่ใจกลางเม็ดแป้ง สำหรับอะมิโลสขนาดโมเลกุลเล็กจะพบอยู่ตามขอบเม็ดโครงสร้างของอะมิโลสเมื่อ อยู่ในสารละลายจะมีหลายรูปแบบ คือ ลักษณะเป็นเกลียวม้วน (Helix) เกลียวที่คล้ายตัว (Interrupted helix) หรือม้วนอย่างไม่เจาะจง (Random coil) ในสารละลายที่อุณหภูมิห้อง อะมิโลสอยู่ในลักษณะที่เป็นเกลียวม้วนหรือเกลียวที่คล้ายตัว แต่ในตัวทำละลายบางชนิดอะมิโลส จะอยู่ในลักษณะม้วนอย่างไม่เจาะจง นอกจากนี้โครงสร้างของอะมิโลสยังขึ้นอยู่กับขนาดโมเลกุลด้วย อะมิโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 6,500 ถึง 160,000 จะอยู่ในลักษณะเกลียวคู่ที่แข็ง (Double helix) ส่วนอะมิโลสที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 6,500 หรือมากกว่า 160,000 จะมีโมเลกุลเป็นม้วนอย่างไม่เจาะจง และอาจมีบางส่วนละลายได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. อะมิโลเพกทิน

อะมิโลเพกทินเป็นพอลิเมอร์เชิงกิ่งของกลูโคส ส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิก  $\alpha$ -1,4 และส่วนที่เป็นกิ่งสาขาที่เป็นพอลิเมอร์กลูโคสสายสั้น มีขนาดโมเลกุล (DP) อยู่ในช่วง 10 ถึง 60 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะกลูโคซิดิกชนิด  $\alpha$ -1,6 ดังรูปที่ 2.8 สมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลเพกทินจากแป้งชนิดต่าง ๆ แสดงได้ดังตารางที่ 2.3



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของอะมิโลเพกทิน [2]

หน่วยกลูโคสที่มีกลูโคซิดิกชนิด  $\alpha$ -1,6 มีอยู่ประมาณ 5% ของปริมาณกลูโคสในอะมิโลเพกทินทั้งหมด ขนาดโมเลกุลของอะมิโลเพกทินในแป้งแต่ละชนิดจะมีค่าประมาณ 2 ล้านหน่วย อะมิโลเพกทินมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 1,000 เท่าของอะมิโลส คือ ประมาณ  $10^7$  ถึง  $10^9$  ดาลตัน และมีอัตราในการคืนตัวต่ำ เนื่องจากอะมิโลเพกทินมีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่ง

ลักษณะโครงสร้างแบบกิ่งของอะมิโลเพกทินประกอบด้วยสายโซ่ (Chain) 3 ชนิด คือ

- 1) **สาย A (A-chain)** เชื่อมต่อกับสายอื่นที่ตำแหน่งเดียว ไม่มีกิ่งเชื่อมต่อออกจากสายชนิดนี้ (Unbranched structure)
- 2) **สาย B (B-chain)** มีโครงสร้างแบบกิ่งเชื่อมต่อกับสายอื่น ๆ 2 สายหรือมากกว่า โครงสร้างอะมิโลเพกทินประกอบด้วยสาย A และสาย B ในอัตราส่วน 0.8-0.9 :1
- 3) **สาย C (C-chain)** เป็นสายแกนซึ่งประกอบด้วยหมู่รีดิวซิง 1 หมู่ ในอะมิโลเพกทินแต่ละโมเลกุล ประกอบด้วยสาย C หนึ่งสายเท่านั้น

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางโครงสร้างของอะมิโลเพกทิน [2]

แหล่งแป้ง	ปริมาณ อะมิโลเพกทิน (%)	ขนาด โมเลกุล (DP)เฉลี่ย	ความยาว สายเฉลี่ย (CL)	จำนวน สายเฉลี่ย (NC)	ความยาวสาย ภายนอกเฉลี่ย (CL)	โมเลกุล กิ่ง (%)
แป้งสาลี	72	4,800	19	250	13	5
แป้งข้าวโพด	72	8,200	22	370	15	6
แป้งข้าวเจ้า	83					
- อินเดียคา		4,700	21	220	14	6
- จาโปนิก		12,800	19	670	13	5
- ข้าวเหนียว		18,500	18	1,000	12	5
แป้งมันสำปะหลัง	79	9,800	24	410	15	8
แป้งมันฝรั่ง	83					

### 3. สารตัวกลาง

สารตัวกลางมีเพียงส่วนน้อยในแป้งบางชนิด องค์ประกอบนี้มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่าอะมิโลเพกทินแต่ใหญ่กว่าอะมิโลส และสารตัวกลางนี้มีโครงสร้างเป็นลักษณะเชิงกิ่งเช่นเดียวกับอะมิโลเพกทิน แต่จะมีกิ่งที่ยาวกว่า ปริมาณหรือสัดส่วนของอะมิโลส อะมิโลเพกทิน และสารตัวกลางในเมล็ดแป้งไม่คงที่ ขึ้นอยู่กับสภาพการเพาะปลูก เช่น เวลาในการเพาะปลูกและปริมาณน้ำระหว่างการเพาะปลูก เป็นต้น

### 4. ส่วนประกอบอื่นๆ ภายในเมล็ดแป้ง

ส่วนประกอบอื่นๆ ภายในเมล็ดแป้ง แบ่งออกเป็น

1. ส่วนที่ไม่ใช่แป้งที่แยกได้จากแป้ง (Particulate material) ได้แก่ โปรตีนที่ไม่ละลาย และผนังเซลล์ซึ่งจะมีผลกระทบต่อกระบวนการผลิตแป้ง
2. ส่วนที่ติดกับพื้นผิวของเมล็ดแป้ง (Surface material) ซึ่งสามารถสกัดออกได้โดยไม่ต้องทำลายเมล็ดแป้ง
3. ส่วนที่ติดอยู่ภายในเมล็ดแป้ง (Internal components) สามารถแยกออกได้โดยการทำลายเมล็ดแป้ง เช่น ไขมันในแป้งจากธัญพืช และสารประกอบไนโตรเจนในแป้ง
4. ส่วนประกอบอื่น ที่มีผลต่อลักษณะและคุณสมบัติของเมล็ดแป้งที่สำคัญ ได้แก่ โปรตีน ไขมัน และ ฟอสฟอรัส ซึ่งมีปริมาณแตกต่างกันในแป้งแต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

### 2.2.2 โครงสร้างและการรวมตัวเป็นเม็ดแป้ง

แป้งที่พบในธรรมชาติจะพบอยู่ในรูปเม็ดแป้ง (Granule) ขนาดเล็ก โดยเมื่อตรวจดูลักษณะของเม็ดแป้งชนิดต่าง ๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดา (รูปที่ 2.9) และแบบอิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope) (รูปที่ 2.10) พบว่าเม็ดแป้งจะมีขนาด รูปร่าง และลักษณะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับแหล่งของแป้งนั้น ๆ

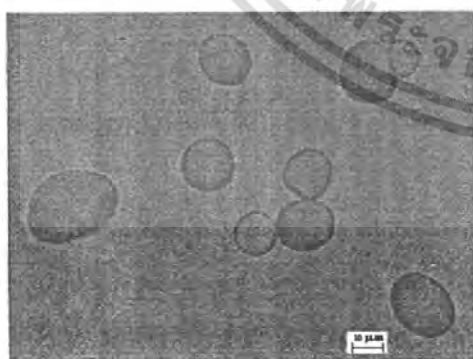
เม็ดแป้งมีโครงสร้างเป็นแบบกึ่งผลึก (Semi-crystalline) โดยโมเลกุลของอะมิโลสและอะมิโลเพกทินจะจัดเรียงตัวในเม็ดแป้งเป็นโครงสร้างทั้งส่วนที่เป็นผลึกและส่วนอสัณฐาน ส่วนสายโซ่ของอะมิโลเพกทินจะจัดเรียงตัวในลักษณะเกลียวคู่ (Double helices) ซึ่งบางส่วนจะเกิดโครงสร้างที่เป็นผลึก ส่วนอสัณฐานของเม็ดแป้งจะประกอบด้วยโมเลกุลของอะมิโลสและสายโซ่ยาวของอะมิโลเพกทิน เม็ดแป้งจะมีลักษณะโครงสร้างผลึก 3 แบบขึ้นอยู่กับความหนาแน่นในการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่



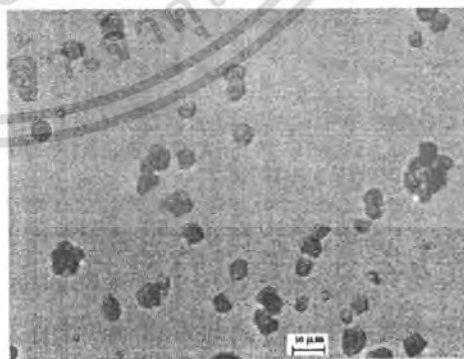
(ก) แป้งมันสำปะหลัง



(ข) แป้งข้าวโพด

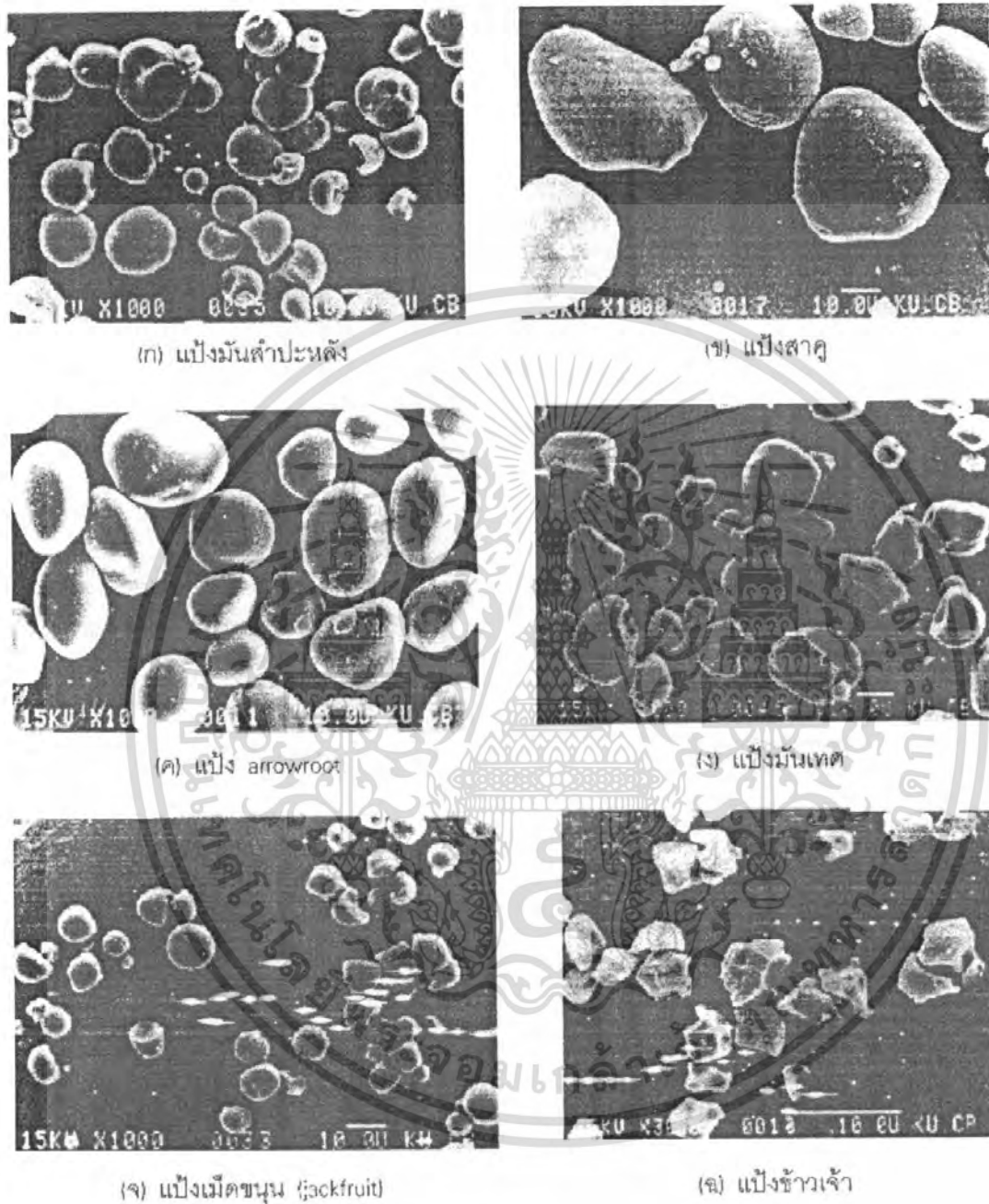


(ค) แป้งมันฝรั่ง



(ง) แป้งข้าวเจ้า

รูปที่ 2.9 ขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้งชนิดต่าง ๆ เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ (กำลังขยาย 40 เท่า) [2] เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 ขนาดและรูปร่างของเม็ดแป้งชนิดต่าง ๆ เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอน ที่กำลังขยาย(ก)-(จ)1,000 เท่า และ (ฉ) 3,000 เท่า [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.3 สมบัติของแป้ง [2]

### 2.3.3.1 การดูดซับน้ำ การพองตัวและการละลาย

เมื่อเติมน้ำลงในแป้งและตั้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเม็ดแป้งจะดูดซับน้ำที่เติมลงไปภายใต้สภาวะบรรยากาศของห้อง จนเกิดสมดุลระหว่างความชื้นภายในเม็ดแป้งกับน้ำที่เติมและความชื้นในบรรยากาศ ปริมาณน้ำที่ถูกดูดซับจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ แป้งส่วนใหญ่เมื่อเกิดสมดุลภายใต้บรรยากาศปกติจะมีความชื้น 10 ถึง 17 %

น้ำที่อยู่ในเม็ดแป้ง มีอยู่ด้วยกัน 3 รูปแบบ คือ น้ำในผลึก (Crystal water) น้ำในรูปที่ไม่อิสระ (Bond water) และน้ำในรูปอิสระ (Free water) โดยมีการจับกับแป้งได้แน่นตามลำดับ และแป้งที่มีความชื้น 8 ถึง 10 % สามารถจับกับน้ำได้แน่นกว่าแป้งที่มีความชื้นสูงกว่านี้ เนื่องจากการจับของน้ำกับหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 6 ของกลูโคสแต่ละหน่วยของแป้ง จะได้สูตรโมโนไฮเดรต  $[n(C_6H_{10}O_5) \cdot H_2O]$

แป้งดิบจะไม่ละลายน้ำที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิเจลาทีไนซ์ เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนซึ่งเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้งที่อยู่ใกล้ ๆ กันเชื่อมต่อกันอยู่ แต่เมื่ออุณหภูมิของสารผสมน้ำแป้งเพิ่มสูงกว่าช่วงอุณหภูมิในการเจลาทีไนซ์ พันธะไฮโดรเจนจะถูกทำลาย โมเลกุลของน้ำจะเข้ามาจับกับหมู่ไฮดรอกซิลที่เป็นอิสระ เม็ดแป้งเกิดการพองตัว ทำให้การละลาย ความหนืด และความใสเพิ่มมากขึ้น สมบัติของการบิดระนาบแสงโพลาไรซ์ (Birefringence) ในเม็ดแป้งจะหมดไป ปัจจัยที่มีผลต่อการพองตัว และความสามารถในการละลาย คือ ชนิดของแป้ง ความแข็งแรง และลักษณะของร่างแหภายในเม็ดแป้ง สิ่งเจือปนภายในเม็ดแป้งที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต ปริมาณน้ำในสารละลายแป้ง รูปแบบในการพองตัว และการละลายของเม็ดแป้งแต่ละชนิดจะมีรูปแบบที่แตกต่างกันไป

### 2.3.3.2 การเกิดเจลาทีไนเซชัน

โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl groups) จำนวนมาก ยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน มีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) แต่เนื่องจากเม็ดแป้งอยู่ในรูปของร่างแห (Micelles) ดังนั้นการจัดเรียงตัวในลักษณะนี้จะทำให้แป้งละลายในน้ำเย็นได้ยาก ดังนั้นขณะที่แป้งอยู่ในน้ำเย็นเม็ดแป้งจะดูดซับน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย แต่เมื่อให้ความร้อนกับสารละลายน้ำแป้ง พันธะไฮโดรเจนจะคลายตัวลง เม็ดแป้งจะดูดน้ำและพองตัว ส่วนผสมของน้ำแป้งจะมีความหนืดมากขึ้นและใสขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของน้ำอิสระที่เหลืออยู่รอบ ๆ เม็ดแป้งเหลือน้อยลง เม็ดแป้งเคลื่อนไหวได้ยากขึ้น ทำให้เกิดความหนืด ปฏิกิริยานี้เรียกว่า การเกิดเจลาทีไนเซชัน (Gelatinization) อุณหภูมิเริ่มเจลาทีไนซ์ มักจะเรียกจุดนี้ว่า อุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (Pasting temperature) หรือเวลาที่เริ่มเปลี่ยนแปลงความหนืด (Pasting time) ซึ่งจะแตกต่างกันในแป้งแต่ละชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดเจลลาติโนเซชันของเม็ดแป้งแบ่งได้ 3 ระยะแรกเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำเย็นได้อย่างจำกัด และเกิดการพองตัวแบบผันกลับได้ เนื่องจากร่างแหระหว่างโมเสลล์ยึดหยุ่นได้จำกัด ความหนืดของสารแขวนลอยจะไม่เพิ่มขึ้นจนเห็นได้ชัด เม็ดแป้งยังคงรักษารูปร่างและโครงสร้างแบบที่เกิดการบดแสงระนาบโพลารไรซ์ได้ เมื่อใส่สารเคมีหรือเพิ่มอุณหภูมิให้สารละลายน้ำแป้งจนถึงประมาณ 65 °C (อุณหภูมิที่แท้จริงขึ้นกับชนิดของแป้ง) เมื่อเริ่มเข้าสู่ระยะที่ 2 เม็ดแป้งจะพองตัวอย่างรวดเร็ว ร่างแหระหว่างโมเสลล์ภายในเม็ดแป้งจะอ่อนแอลง เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำเข้ามามากและเกิดการพองตัวแบบผันกลับได้ เรียกว่าการเกิดเจลลาติโนเซชัน เม็ดแป้งมีการเปลี่ยนรูปร่างแลโครงสร้างแบบที่เกิดการบดแสงระนาบโพลารไรซ์ได้ ความหนืดของสารละลายน้ำแป้งจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แป้งที่ละลายได้จะเริ่มละลายออกมา ซึ่งถ้าเหวี่ยงแยกส่วนใสและหยดสารละลายไอโอดีนลงในส่วนใสจะเกิดสีน้ำเงินเข้ม เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิต่อไปอีกจนเข้าสู่ระยะที่ 3 รูปร่างเม็ดแป้งจะไม่แน่นอน การละลายของแป้งจะเพิ่มขึ้น เมื่อนำไปทำให้เย็นจะเกิดเจล การเกิดเจลลาติโนเซชันของแป้งจะทำให้หมู่ไฮดรอกซิลของแป้งสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่น ๆ ได้ดีขึ้น รวมทั้งพร้อมที่จะถูกย่อยด้วยน้ำย่อยต่างๆ ได้ดีกว่า

### 2.3.3.3 การเกิดรีโทรเกรเดชัน

เมื่อแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลลาติโนเซชันแล้วให้ความร้อนต่อไป จะทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดที่พองตัวเต็มที่และแตกออก โมเลกุลของอะมิโลสขนาดเล็กจะกระจายออกมาทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัว โมเลกุลอะมิโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจับเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นร่างแหสามมิติ โครงสร้างใหม่นี้สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการดูดน้ำเข้ามาอีก มีความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดลักษณะเจลเหนียว คล้ายฟิล์มหรือผลึก เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) หรือการคืนตัว (Setback) ดังรูปที่ 2.11 เมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงไปอีกลักษณะการเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้น โมเลกุลอิสระของน้ำที่อยู่ภายในจะถูกบีบออกมานอกเจล ซึ่งเรียกว่า Syneresis ปรากฏการณ์ทั้งสองนี้จะทำให้เจลมีลักษณะขรุขระและมีความหนืดเพิ่มขึ้น

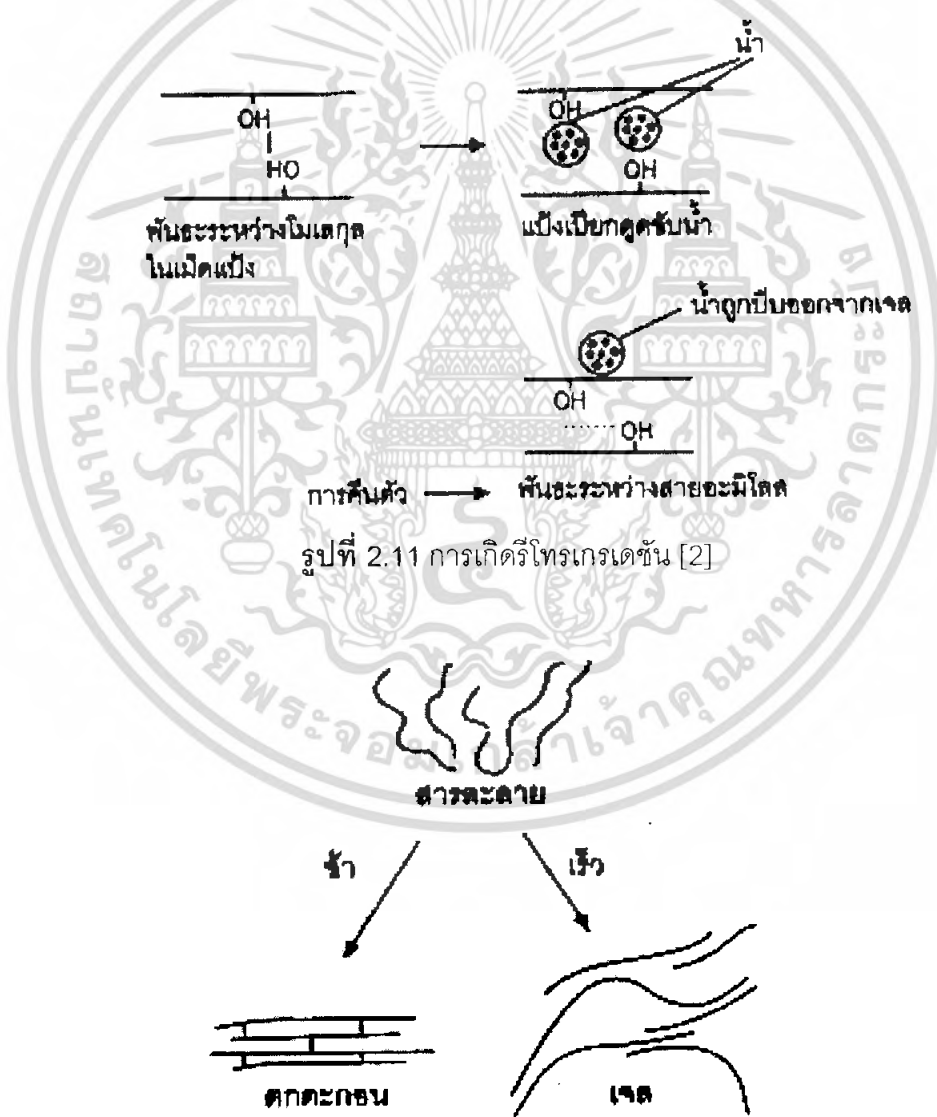
การคืนตัวของแป้งเปียกและสารละลายแป้งทำให้สารละลายแป้งมีความหนืดเพิ่มขึ้น มีลักษณะขุ่นและทึบแสง เกิดขึ้นส่วนที่ไม่ละลายในแป้งเปียกที่ร้อน เกิดการตกตะกอนของอนุภาคแป้งที่ไม่ละลาย ทำให้เกิดเจล และโมเลกุลน้ำถูกบีบออกมานอกเจล ในการคืนตัวของแป้งเมื่อเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ จะเกิดการตกตะกอน เมื่อเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจะทำให้เกิดเจลขุ่น

การคืนตัวของแป้งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ชนิดของแป้ง ความเข้มข้นของแป้ง กระบวนการให้ความร้อน กระบวนการให้ความเย็น อุณหภูมิ ระยะเวลา ความเป็นกรด-เบส (pH) ของสารละลาย ปริมาณและขนาดอะมิโลส อะมิโลเพกทิน และองค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ ในแป้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำและความเข้มข้นของแป้งสูง แป้งสามารถคืนตัวได้ดี ในช่วง pH 5-7 แป้งสามารถคืนตัวได้เร็วที่สุด สำหรับช่วง pH ที่สูงหรือต่ำกว่านี้แป้งจะคืนตัวได้ช้าลง ในการชะลอการคืนตัวของแป้งจะใช้เกลือที่มีประจุลบและบวก แคลเซียมไนเตรท และยูเรีย กลไกการคืนตัวของแป้งแสดงได้ดังรูปที่ 2.12

ปริมาณและขนาดของอะมิโลสมีความสำคัญต่อการคืนตัวของแป้ง แป้งที่มีปริมาณอะมิโลสสูงจะเกิดการคืนตัวได้มากและเร็วกว่าแป้งที่มีปริมาณอะมิโลสเพกทินสูง อัตราในการคืนตัวจะสูงสุด (การละลายต่ำที่สุด) เมื่อขนาดโมเลกุล (Degree of polymerization) ของอะมิโลสเท่ากับ 100 ถึง 200 อัตราการคืนตัวจะลดลงเมื่อโมเลกุลของอะมิโลสยาวหรือสั้นกว่านี้ ในการทำให้อะมิโลสที่คืนตัวกลับมาละลายได้อีกครั้งหนึ่งต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 100 ถึง 160 °C อะมิโลสเพกทินจะมีผลทำให้เกิดการคืนตัวน้อยมาก ดังนั้นแป้งแต่ละชนิดจะมีอัตราการคืนตัวที่แตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 2.4



รูปที่ 2.12 กลไกการคืนตัวของแป้ง [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 อัตราการคืนตัวของแป้งแต่ละชนิด [2]

ชนิดของแป้ง	%การตกตะกอนของส่วนที่ไม่ละลาย		
	5 วัน	10 วัน	30 วัน
แป้งมันฝรั่ง	10	15	20
แป้งข้าวโพด	37	48	62
แป้งสาลี	45	48	52
แป้งมันสำปะหลัง	11	12	13
แป้งข้าวโพดเหนียว	0.2	0.5	1

### 2.2.4 แป้งข้าวเจ้า

ข้าวเจ้าหรือ *Oryza sativa* L. มีต้นกำเนิดในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ มีหลายพันธุ์ ได้แก่ พันธุ์อินดิกา (*O. sativa indica*) ปลูกมาในแถบมรสุม ซึ่งมีฝนตกชุกและแสงแดดเพียงพอ และพันธุ์ จาปอนิกา (*O. sativa indica*) ปลูกในพื้นที่เขตอบอุ่น ข้าวที่ใช้ในกระบวนการผลิตจะเป็นข้าวหักหรือ ข้าวเกรดสองที่ไม่เหมาะต่อการบริโภคโดยตรง ข้าวหักมีองค์ประกอบดังตารางที่ 2.5 แป้งข้าวเจ้ามี ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารต่าง ๆ มากมาย ใช้เป็นส่วนประกอบของแป้งฝุ่นในอุตสาหกรรม เครื่องสำอาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งแป้งฝุ่นสำหรับเด็กเนื่องจากแป้งข้าวไม่เป็นพิษและไม่มีสารระคายเคือง และใช้เป็นสารทำให้แข็ง (laundry stiffening agent) ในการซักผ้า

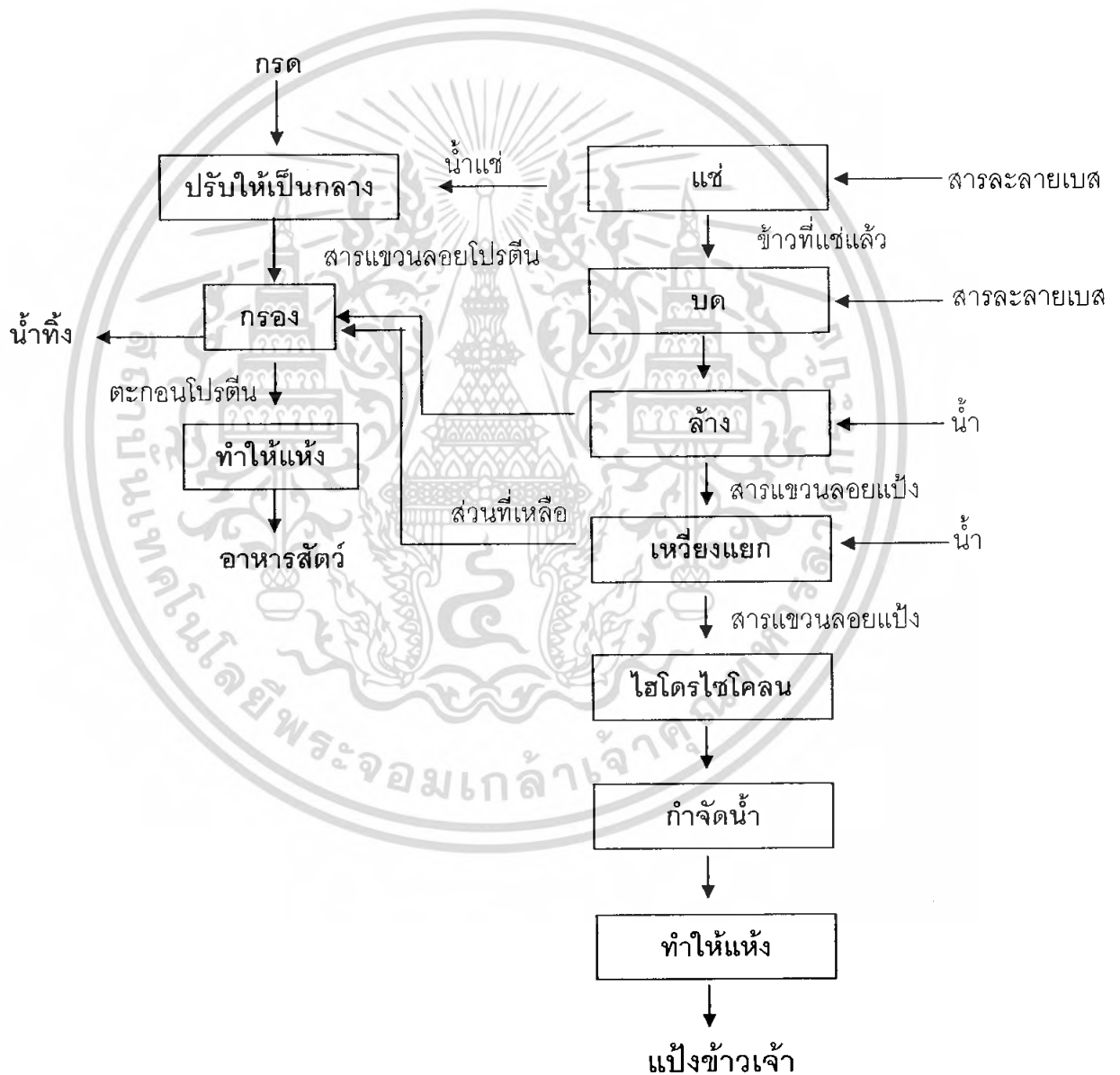
ในการผลิตแป้งข้าวเจ้าในประเทศไทยนั้น ถึงจะเป็นการไม่เปียก แต่โปรตีนและสิ่ง แปรกลปอมส่วนใหญ่ยังติดอยู่กับแป้ง ผลิตภัณฑ์ที่ผลิตได้เป็นประเภทฟลาวร์ (Rice flour) และนิยม ใช้ข้าวที่มีอะมิโลสสูง ข้าวหอมมะลิที่บริโภคไม่เหมาะสมใช้ผลิตฟลาวร์ เพราะมีปริมาณอะมิโลสต่ำ ส่วนการผลิตแป้งสตาร์ช (Rice starch) คือการสกัดเอาโปรตีนและสิ่งแปรกลปอมในแป้งฟลาวร์ออก จนเกือบหมด

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบภายในเมล็ดข้าวหัก [2]

องค์ประกอบ	ร้อยละ
ความชื้น	12.0
แป้ง	79.2
โปรตีน	7.0
ไขมัน	0.4
เถ้า	0.5
ส่วนที่เหลือ	0.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการผลิต เริ่มจากนำข้าวเปลือกมาล้างทำความสะอาด แยกสิ่งแปลกปลอม (ถ้าเป็นข้าวเปลือก ต้องผ่านการสีก่อน) แช่วในสารละลายเบสพร้อมกับการกวนข้าว ๆ ทำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อแยกโปรตีนที่ติดอยู่กับเมล็ดข้าวเจ้าออก ปล่อยให้ข้าวตกตะกอน แยกส่วนไลที่มีโปรตีน (Steep liquor) ออก ทำซ้ำขั้นตอนนี้จนกระทั่งเมล็ดข้าวนิ่ม แล้วนำเมล็ดข้าวมาบดเปียกด้วยสารละลายเบส ล้างน้ำ และเหวี่ยงแยกโปรตีนส่วนที่ติดอยู่ในสารแขวนลอยแป้งออก นำมาผ่านไฮโดรไซโคลน กำจัดน้ำ แล้วทำให้แห้ง นำแป้งมาทำให้แห้ง ได้ผลิตภัณฑ์เป็นแป้งข้าวเจ้า ดังแสดงกระบวนการผลิตแป้งข้าวเจ้าในรูปที่ 2.13 สมบัติของแป้งข้าวเจ้าแสดงในตารางที่ 2.4



รูปที่ 2.13 แผนภาพกระบวนการผลิตแป้งสตาร์ชข้าวเจ้า [2]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการผลิตแป้งสตาร์ชข้าวเจ้าสามารถทำจากแป้งฟลาว์ก็ได้ โดยนำแป้งฟลาว์มาแช่น้ำเบสอ่อน (0.3% NaOH) ในเวลา 24 ชั่วโมง สามารถละลายโปรตีนออกมาได้ 86%

ตารางที่ 2.6 สมบัติของแป้งข้าวเจ้า [2]

สมบัติ	แป้งข้าวเจ้า
ขนาดเม็ดแป้ง (ไมครอน)	6-8
ปริมาณอะมิโลส (%)	18-27
ขนาดอะมิโลส (Degree of polymerization)	900-1,100
อุณหภูมิเริ่มต้นเกิดเจลลิตีไนซ์ (Onset temperature, $T_o$ , °C)	60
อุณหภูมิสูงสุดที่เกิดเจลลิตีไนซ์ (Peak temperature, $T_p$ , °C)	77

### 2.2.5 แป้งในรูปเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic Starch)

ในธรรมชาติโมเลกุลของอะมิโลสและอะมิโลเพกทินมีการจัดเรียงตัวกัน โดยมีการสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลเกิดเป็นโครงสร้างผลึกที่ค่อนข้างแข็งแรงอยู่ในรูปของเม็ดแป้ง ทำให้เม็ดแป้งมีอุณหภูมิการหลอมตัวที่สูงมาก โดยปกติอุณหภูมิการหลอมตัวของเม็ดแป้งสูงกว่าอุณหภูมิการสลายตัว ทำให้แป้งไม่สามารถหลอมตัวได้ นั่นคือ ถ้าได้รับความร้อนสูง (มากกว่า 265 องศาเซลเซียส) แป้งจะเกิดการเผาไหม้ก่อนการหลอมตัว

**เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic Starch )** หมายถึง วัสดุที่สามารถหลอมตัวและนำไปขึ้นรูปเป็นแบบต่างๆ ได้ โดยการใช้ความร้อนและความดัน จากสมบัติของแป้งที่กล่าวข้างต้นจะเห็นว่าโดยธรรมชาติแล้ว แป้งไม่มีคุณสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติกเลย ซึ่งเราสามารถทำให้แป้งมีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติกได้โดยการใช้สารเติมแต่ง (Additive) คือ พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers) ช่วยทำให้โครงสร้างของเม็ดแป้งเกิดการหลอมตัวที่อุณหภูมิต่ำลง ซึ่งจะทำให้โมเลกุลของอะมิโลส และอะมิโลเพกทินเป็นอิสระมากขึ้น ดังนั้นเราจึงนำแป้งมาขึ้นรูปเป็นแผ่น หรือขึ้นรูปเป็นรูปแบบต่างๆ ได้ พลาสติกที่ผลิตได้โดยวิธีนี้จึงเรียกว่า **เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช (Thermoplastic Starch ,TPS)**

## 2.3 พลาสติไซเซอร์ (Plasticizers) [3]

พลาสติไซเซอร์จะช่วยเพิ่มความสามารถในการไหลแบบพลาสติก (Plastic flow) ซึ่งการไหลแบบพลาสติก หมายถึง การไหลของวัสดุที่ต้องอาศัยความเค้นหรือแรงน้อยที่สุดขนาดหนึ่งมากกว่าต่อวัสดุนั้น ซึ่งความเค้นหรือแรงขนาดน้อยที่สุดที่ทำให้วัสดุเกิดการไหลนี้เรียกว่า Yield value

### 2.3.1 พลาสติไซเซชันและพลาสติไซเซอร์ (Plasticization and Plasticizers)

พลาสติไซเซชัน หมายถึง กรรมวิธีหรือกระบวนการที่ทำให้พอลิเมอร์เกิดการไหลแบบพลาสติก ซึ่งอาจทำได้โดยการให้ความร้อนหรือการใส่พลาสติไซเซอร์ โดนพลาสติไซเซอร์จะไปลดแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของพอลิเมอร์ทำให้พอลิเมอร์เคลื่อนที่ได้มากขึ้นเป็นผลให้พอลิเมอร์อ่อนตัวและเปลี่ยนรูปร่างได้ง่ายขึ้น ซึ่งกระบวนการผสมพลาสติไซเซอร์เข้าไปในพอลิเมอร์โดยไม่มีปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นระหว่างพลาสติไซเซอร์และพอลิเมอร์เรียกว่า **พลาสติไซเซชันภายนอก (External plasticization)** และเรียกพลาสติไซเซอร์ที่ผสมลงไปว่า **พลาสติไซเซอร์ภายนอก (External plasticizer)** ซึ่งพลาสติไซเซอร์ชนิดนี้จะช่วยให้พอลิเมอร์เกิดการไหลแบบพลาสติกโดยอำนาจการทำลาย

ข้อดีของพลาสติไซเซอร์ภายนอก คือ สามารถทำให้พอลิเมอร์มีความอ่อนตัวน้อยหรือมากตามความต้องการในการใช้งานได้โดยการปรับชนิดและปริมาณของพลาสติไซเซอร์ที่ใส่ลงไป แต่ก็มีจุดด้อย คือ พลาสติไซเซอร์ที่ใช้อาจถูกสกัดออกจากพอลิเมอร์ได้

โดยทั่วไปแล้วพลาสติไซเซอร์ภายนอกเป็นของเหลวที่มีจุดเดือดสูง มีความดันไอต่ำ ระเหยยาก ละลายได้ในพอลิเมอร์ และมีอุณหภูมิ  $T_g$  ประมาณหรือใกล้เคียง  $-50^{\circ}\text{C}$  ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ **พลาสติไซเซอร์แท้จริงหรือพลาสติไซเซอร์ปฐมภูมิ (True plasticizer or primary plasticizer)** และ **พลาสติไซเซอร์เสริมหรือพลาสติไซเซอร์ทุติยภูมิ (Secondary plasticizer)** โดยพลาสติไซเซอร์แท้จริงสามารถเข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิขึ้นรูปได้ดี สามารถใช้เดี่ยวๆ ได้ และไม่เยิ้มออกมาจากพอลิเมอร์ ในขณะที่พลาสติไซเซอร์เสริมมีความสามารถในการเข้าเป็นเนื้อเดียวกับพอลิเมอร์ได้จำกัด จึงไม่สามารถใช้ตามลำพังได้ ต้องใช้ควบคู่กับพลาสติไซเซอร์แท้จริงและช่วยเสริมประสิทธิภาพของพลาสติไซเซอร์แท้จริง นอกจากนี้การใช้พลาสติไซเซอร์เสริมยังช่วยลดต้นทุนการผลิตและปรับปรุงสมบัติอื่น ๆ ของพอลิเมอร์ด้วย

## 2.4 เส้นใย (fibers) [4]

**เส้นใย** หมายถึง หน่วยที่เล็กที่สุดของวัสดุสิ่งทอ โดยปกติจะถูกจำแนกโดยความอ่อนตัว ความละเอียด และอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อความหนาต่างๆ

เส้นใยสามารถจำแนกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

1. เส้นใยที่มาจากธรรมชาติ (Natural Fibers)
2. เส้นใยที่มนุษย์สร้างขึ้น (Man-made Fibers)

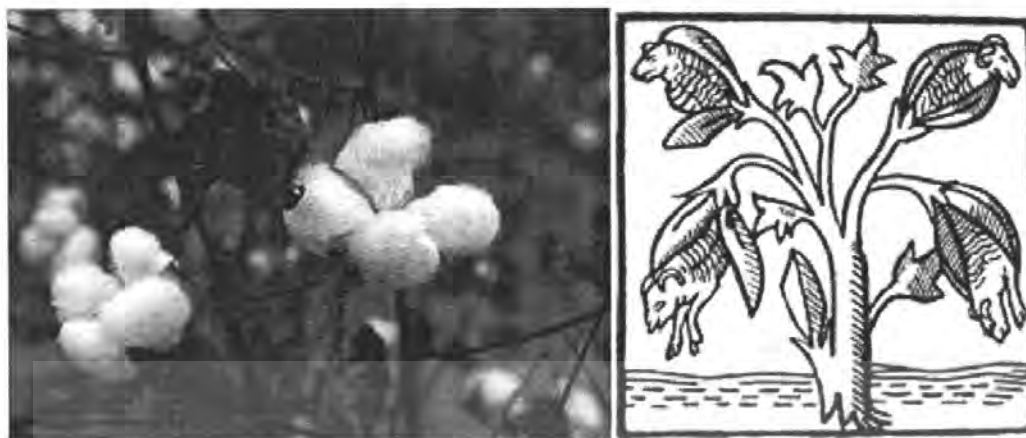
**เส้นใยธรรมชาติ** หมายถึง เส้นใยที่เกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติ เช่น เส้นใยขนสัตว์ เส้นใยจากพืช หรือเส้นใยจากแร่ธาตุต่างๆ สามารถแบ่งออกได้เป็นสามประเภทใหญ่ ๆ ตามแหล่งกำเนิด เส้นใย คือ เส้นใยที่ได้มาจากพืช เส้นใยที่ได้มาจากสัตว์ เส้นใยที่ได้มาจากแร่ธาตุ

### 2.4.1 เส้นใยฝ้าย ( Cotton fiber) [4]

เส้นใยฝ้าย คือ เส้นใยที่มีลักษณะนุ่มที่เกิดขึ้นรอบ ๆ เมล็ดจากต้นฝ้าย ซึ่งเป็นไม้พื้นเมืองชนิดต้นเตี้ยที่มีอยู่ทั่วโลก ทั้งในประเทศอเมริกา อินเดีย และแอฟริกาเป็นส่วนใหญ่ แต่เส้นใยฝ้ายในตลาดส่วนใหญ่ทั่วโลกเป็นพันธุ์พื้นเมืองที่มีชื่อว่า กอสลีเปียม ฮิสชูตัม (*Gossypium hirsutum*) และ กอสลีเปียม บาบาเดนส์ (*Gossypium barbadense*) จากประเทศอเมริกา เส้นใยฝ้ายมักถูกทอเป็นหลอด และใช้เป็นด้ายที่นุ่มและมีการระบายอากาศที่ดี ที่นิยมใช้แปรรูปเป็นเครื่องนุ่งห่มอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน

เส้นใยฝ้ายสามารถผลิตได้จากการแยกเมล็ด ชี้นำและโปรตีนออก เป็นรูปของเซลลูโลสบริสุทธิ์ (Cellulose) หรือเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติ (Natural polymer) ผลิตภัณฑ์จากเส้นใยฝ้ายมีประสิทธิภาพค่อนข้างสูง มีความแข็งแรงสูง คงทน และดูดซับได้ดี เพราะมีการเสียน้ำหนักน้อยมากกว่า 10% ระหว่างกระบวนการแปรรูปจากวัตถุดิบฝ้าย (Raw cotton balls) เป็นเส้นใยฝ้าย โดยเส้นใยหนึ่งเส้นเกิดจากเซลลูโลส 20 ถึง 30 ชั้นเรียงตัวเป็นขดซึ่งยังช่วยให้เส้นใยมีความยืดหยุ่นที่ดีขึ้นอีกด้วย เมื่อเมล็ดฝ้าย (Cotton boll) แตกออก เส้นใยแห้งจะถูกทำให้อยู่รูปแผ่นแบน เกลียว หรือมีลักษณะคล้ายริบบิ้น (Ribbon-like shapes) และจะขดเข้าด้วยกัน จากนั้นจะผูกติดกันไว้เพื่อความสะดวกในกระบวนการปั่น (Spinning) เป็นเส้นด้าย (Yarn) ต่อไป

เส้นใยฝ้ายนั้นมีความละเอียดมาก มีความยาวเส้นใยตั้งแต่ 10-56 มิลลิเมตร ขึ้นอยู่กับคุณภาพของเส้นใย เส้นใยฝ้ายจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 11-22 ไมครอน เป็นเส้นใยที่ละเอียดมาก ๆ มีขนาดค่อนข้างสม่ำเสมอตลอดเส้นใย ซึ่งเส้นใยฝ้ายจะมีสีออกขาวจนถึงสีเทาอ่อน



รูปที่ 2.14 ต้นฝ้าย และเมล็ดฝ้าย [4]

#### 2.4.1.1 ลักษณะการจัดเรียงตัวภายในเส้นใย

1. บริเวณที่เป็นส่วนที่ไม่เป็นระเบียบ (Amorphous Regions) เป็นบริเวณที่สามารถรับน้ำและความชื้น ดังนั้น จะเป็นบริเวณที่ยอมให้สีย้อมเข้าไปได้ แต่จะเป็นส่วนที่ไม่แข็งแรง
2. บริเวณที่เป็นส่วนที่เป็นระเบียบ (Crystalline Regions) เป็นบริเวณที่ไม่สามารถรับน้ำและความชื้น เป็นส่วนที่แข็งแรงของเส้นใยเนื่องจากโซโมเลกุลเรียงตัวเป็นระเบียบ
3. การจัดเรียงตัวของส่วนที่เป็นระเบียบตามแนวแกนเส้นใย (Orientation) เป็นบริเวณที่มีส่วนที่เป็นระเบียบเรียงตัวตามแนวแกนของเส้นใย ทำให้เพิ่มความแข็งแรงในด้านการทนแรงดึงตามแนวแกนเส้นใยได้

#### 2.4.1.2 องค์ประกอบทางเคมี

เซลลูโลส (Cellulose) เป็นคาร์โบไฮเดรตชนิดพอลิแซ็กคาไรด์ (polymer polysaccharide carbohydrate) ที่มีสายโซ่ยาว ประกอบด้วยกลูโคสชนิดเบต้า ( $\beta$ -glucose) โดยมีโครงสร้างเคมี คือ  $(C_6H_{10}O_5)_n$

เซลลูโลสมอนอเมอร์ประกอบจาก กลูโคสชนิดเบต้าที่เชื่อมเข้าด้วยกันในรูปของ 1,4 glycosidic bonds ซึ่งโครงสร้างของเซลลูโลสเป็นโซ่ตรงที่ไม่มีการขดตัวเกิดขึ้น และมีการเชื่อมกันด้วยพันธะไฮโดรเจนที่หมู่ไฮดรอกไซด์ในรูปของเส้นใยขนาดเล็ก (Micro fibrils) ซึ่งทำให้สายโซ่มีความหนาแน่นมากขึ้นอันนำไปสู่ความแข็งแรงที่มากขึ้นนั่นเอง โดยความแข็งแรงนี้จะทำให้ผนังเซลล์ที่เป็นส่วนประกอบของคาร์โบไฮเดรตนั้นมีความแข็งแรงมากขึ้นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.1.3 สมบัติทางกายภาพ

#### ความเหนียว (Tenacity)

ความแข็งแรงของฝ้าย เนื่องมาจากการจัดเรียงตัวที่ดีของพอลิเมอร์ที่ยาว (มีค่าความเป็นผลึกประมาณ 70%) มีการสร้างตัวของพันธะไฮโดรเจนระหว่างพอลิเมอร์ที่ติดกัน

เส้นใยฝ้ายเป็นเส้นใยที่แข็งแรงกว่าเดิมเมื่อเปียกน้ำ เนื่องจากการจัดเรียงตัวใหม่อย่างชั่วคราว ในส่วนที่ไม่เป็นระเบียบ การจัดเรียงตัวที่ดีขึ้น เมื่อเปียกน้ำยังผลให้เพิ่มปริมาณของพันธะไฮโดรเจนขึ้น ทำให้ค่าเหนียว (Tenacity) เพิ่มขึ้นประมาณ 5 %

ธรรมชาติของการยืดหยุ่นตัวและความเป็นพลาสติก

เส้นใยฝ้ายจะไม่มีคามยืดหยุ่นตัว เพราะว่าเป็นเส้นใยที่มีส่วนที่เป็นผลึกสูง

เนื่องจากการที่มีส่วนที่เป็นระเบียบมาก ทำให้ไม่สามารถจะพับ หรือทบ เพราะจะทำให้พอลิเมอร์ขาดออกจากกันทำให้ผ้าฉีกขาดง่าย ซึ่งเป็นจุดอ่อนของพอลิเมอร์นี้

#### ธรรมชาติของการดูดซึมความชื้น

ฝ้ายเป็นเส้นใยที่ดูดซึมความชื้นได้ดี เนื่องจากมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) มากมายในพอลิเมอร์ อย่างไรก็ตามการที่น้ำจะสามารถแทรกซึมจะเป็นบริเวณที่ไม่เป็นระเบียบเท่านั้น เพราะว่าช่องว่างภายในของบริเวณที่เป็นผลึกมีขนาดเล็กกว่าโมเลกุลของน้ำ การพองตัวในน้ำก็เช่นเดียวกันจะเกิดในบริเวณที่ไม่เป็นระเบียบ

สำหรับสมบัติอื่น ๆ ของเส้นใยฝ้ายแสดงได้ดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 สมบัติของเส้นใยฝ้าย [4]

Property	Evaluation
Shape	Fairly uniform in width, 12-20 microns; length varies from ½ to 2½ inches; typical length is ¾ to 1¼ inches.
Luster	Low
Tenacity (strength)	
• Dry	3.0-5.0 g/d
• Wet	3.3-6.0 g/d
Resiliency	Low
Density	1.54-1.56 g/cm <sup>3</sup>
Moisture absorption	
• raw:conditioned	8.5%
saturation mercerized:	
• conditioned	15-25%
• saturation	8.5-10.3%
Dimensional stability	Good
Resistance to	
• acids	damage, weaken fibers
• alkalis	resistant; no harmful effects
• organic solvents	high resistance to most
• sunlight	Prolonged exposure weakens fibers
• microorganisms	Mildew and rot-producing bacteria damage fibers
• insects	Silverfish damage fibers
Thermal reactions	
• to heat	Decomposes after prolonged exposure to temperatures
• to flame	of 150 °C or overburns readily

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### อุณหภูมิวิกฤติ (Critical temperatures)

- อุณหภูมิใช้งานทั่วไป ต้องไม่ต่ำกว่า 77°F (25°C)
- อุณหภูมิที่เหมาะสม 68°F (20°C)
- อุณหภูมิวาบไฟ 248°F (120°C)
- อุณหภูมิลุกไหม้ 401°F (205°C)
- อุณหภูมิเผาไหม้ 410°F (210°C)
- อุณหภูมิจุดติด 765°F (407°C)

โดยเซลล์โลสที่แห้งจะแข็งกระด้างและเปราะ ไม่ยืดหยุ่นที่อุณหภูมิห้อง (25 °C) และจะติดไฟได้ง่าย

ที่ช่วงอุณหภูมิ 25°C ถึง 35°C เป็นช่วงที่เหมาะสมแก่การขึ้นรูปเพื่อนำไปใช้งาน และที่อุณหภูมิต่ำกว่า 0°C จะช่วยลดการเน่าเสียของเส้นใยผ้าได้ จึงเป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการเก็บรักษาเซลล์โลสที่ใช้กันทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

**วรวิทย์ โพนนิกร** [5] ได้ศึกษาถึงพอลิเมอร์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยการนำพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High Density Polyethylene, HDPE) จากขวดน้ำดื่มมาทำการผสมกับสารตัวเติมอินทรีย์ธรรมชาติ ได้แก่ แป้งข้าวเจ้า แป้งสาลี และแป้งท้าวยายม่อมโดยใช้ปริมาณแป้ง 10% 20% และ 30% โดยการหลอมและนำไปขึ้นรูปเพื่อศึกษาชนิดและปริมาณของแป้งที่ส่งผลต่อการย่อยสลายของพอลิเมอร์ ผลการทดลองพบว่า ชนิดและปริมาณของแป้งมีผลต่อการทดสอบความแข็งแรงดึง กล่าวคือ เมื่อปริมาณแป้งมากขึ้นทำให้ความทนแรงดึง ณ จุดขาดมีค่าลดลง ส่วนค่ามอดุลัสมีค่าเพิ่มขึ้น ผลการทดสอบสมบัติทางความร้อนพบว่า พอลิเมอร์ที่มีการเติมแป้งสามารถทนความร้อนได้สูงกว่าพอลิเมอร์ที่ไม่ได้เติมแป้ง และเมื่อทำการศึกษาลักษณะด้วยเทคนิค SEM พบว่าหลังการฝังกลบ พอลิเมอร์ที่มีการเติมแป้งชนิดต่าง ๆ เกิดการย่อยสลายได้เร็วกว่าพอลิเมอร์ที่ไม่มีการเติมแป้ง และการเติมแป้งสาลีทำให้เกิดการย่อยสลายได้เร็วกว่าการเติมแป้งข้าวเจ้า และแป้งท้าวยายม่อม ตามลำดับ

**กิตติวุฒิ ธนรัตน์พัฒนกิจ, พชร เทียมธาดา และ ราชวัลลภ แจ่มมงคล** [6] งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการขึ้นรูปพลาสติกที่ย่อยสลายได้โดยกระบวนการฉีดรูป วัสดุดิบที่นำมาใช้ในการศึกษา ได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวเหนียว โดยมีกลีเซอรอลทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซอร์ น้ำมันพาราฟิน และกรดสเตียริกทำหน้าที่เป็นสารหล่อลื่นในกระบวนการผลิต การผสมอัตราส่วนวัสดุต่าง ๆ ใช้เครื่องผสมความเร็วสูงและเครื่องอัดรีดเกลียวหนอนคู่ จากนั้นทำการบดและนำไปขึ้นรูปขึ้นงานด้วยเครื่องฉีดขึ้นรูป ผลการทดสอบระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียวพบว่า ค่ามอดุลัสมีลักษณะเป็นรูปตัวยู U โดยมีจุดสูงสุดที่สูตรแป้งมันสำปะหลัง 70% และแป้งข้าวเหนียว 30% และจุดต่ำสุดเมื่อใช้แป้งมันสำปะหลัง 50% และแป้งข้าวเหนียว 50% การทดสอบเปอร์เซ็นต์การดึงยึดและความแข็งแรง ความแข็งแรงกระแทกพบว่า เมื่อใช้อัตราส่วนแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียวที่ 50:50 ให้ค่าที่สูงที่สุด เมื่อทดสอบความแข็งแรงกดพบว่ามีค่าใกล้เคียงกันในทุกอัตราส่วนผสมระหว่างแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวเหนียว การทดสอบดูดความชื้นพบว่า ขึ้นงานดูดความชื้นที่ 7-8% เมื่อใช้กลีเซอรอล 33% และดูดความชื้น 4-5% เมื่อลดปริมาณกลีเซอรอลเป็น 25% การทดสอบทางความร้อนพบว่า ขึ้นงานเริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิประมาณ 190 °C เมื่อนำขึ้นงานไปทดสอบการย่อยสลายโดยเชื้อรา ซึ่งทำหน้าที่ผลิตเอนไซม์เพื่อย่อยแป้งเป็นน้ำตาล พบว่าขึ้นงานสามารถย่อยสลายได้โดยพิสูจน์จากปริมาณน้ำตาลที่เพิ่มขึ้นในจานเพาะเชื้อ

**กนิษฐา อังกูร์รัตน์** [7] ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติของพอลิพรอพิลีนโดยใช้ซีลีเยียมจากไม้เต็งนอกเป็นสารเสริมแรงโดยใช้สารคู่ควบ Silane ชนิด A-172 (Vinyl-tris-(2-methoxyethoxy) silane) และมาเลอิกแอนไฮไดรยด์กราฟท์พอลิพรอพิลีน (MAPP) เพื่อปรับปรุงความเข้ากันได้และการยึดเกาะกันของเมทริกซ์และส่วนเสริมแรง พบว่า สารคู่ควบทั้ง 2 ชนิด ช่วยทำให้ค่าความแข็งแรงดึง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และความแข็งแรงโค้งงอของคอมโพสิตเพิ่มขึ้น และการใช้สารคู่ควบ Silane ให้สมบัติเชิงกลสูงกว่า การใช้ MAPP สำหรับการใส่สารคู่ควบทั้งสองชนิดร่วมกันช่วยปรับปรุงสมบัติด้านโค้งงอดีกว่าการใช้สารคู่ควบชนิดเดียวนอกจากนี้การใช้สารคู่ควบผสมที่อัตราส่วน MAPP:Silane เท่ากับ 1:1 เหมาะสมที่สุด ส่วนสัดส่วนวิทยาของคอมโพสิตจากการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงให้เห็นว่าการใช้สารคู่ควบสามารถปรับปรุงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างวัฏภาคทั้งสองที่แตกต่างกันได้

กาญจนา อุทัยฉาย, โกสิน หาชะวี, นเรนทร์ อาศัยพานิชย์, นัฐพร สุรพัฒน์, วันชัย เลิศวิจิตรจรัส และ อำนาจ สิทธิตระกูล [8] ได้ศึกษาการเตรียมเทอร์โมพลาสติกจาก แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวเจ้า และแป้งข้าวเหนียว โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ (15%, 20%, 25% และ 30% โดยน้ำหนัก) และมีการเติมผงแคลบ 3% โดยน้ำหนัก เพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกลของ TPS ทำการผสมด้วยเครื่องอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ แล้วนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานตัวอย่างด้วยเครื่องอัดฉีด พบว่า TPS ที่เตรียมได้จากแป้งข้าวเหนียวและกลีเซอรอล 15% โดยน้ำหนัก มีค่าความแข็งแรงดึงมากที่สุด และการเติมผงแคลบขนาด 0.038-0.150 มิลลิเมตร ปริมาณ 1% โดยน้ำหนัก ทำให้ TPS มีความแข็งแรงดึง และ ความแข็งแรงกระแทกสูงขึ้น

U. Funke, W. Bergthaller and M.G. Lindhauer [9] ได้ศึกษากระบวนการผลิตและลักษณะเฉพาะของผลิตภัณฑ์ที่ทำจากแป้งข้าวโพดที่มีอะมิโลสเป็นองค์ประกอบ 0%, 23% และ 70% ตามลำดับ ซึ่งสามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ โดยทำการอัดรีดและอัดฉีดของผสมระหว่างแป้งชนิดต่างๆ พลาสติกไซเซอร์ (น้ำ, กลีเซอรอล, ซอร์บิทอล) และเส้นใย (Cellunier F, Temming 500) ด้วยกระบวนการแบบดั้งเดิม (Conventional extrusion and injection molding technique) ซึ่งสภาวะของกระบวนการ และสมบัติของผลิตภัณฑ์แตกต่างกันไปตามชนิดของแป้งและของผสมที่ใช้ ผลจากการศึกษาพบว่าทำให้ความร้อนและแรงเชิงกลแก่แบ่งไปพร้อมๆ กัน ทำให้แป้งเกิด Depolymerization โดยเฉพาะในส่วนที่เป็นอะมิโลเพกทิน ในขณะที่ส่วนของอะมิโลสยังคงมีเสถียรภาพอยู่ เมื่อพิจารณาถึงสมบัติเชิงกลและสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ พบว่าผลิตภัณฑ์ที่มีการเติมเส้นใยลงไปปริมาณน้อย ตั้งแต่ 2-7% ให้ค่าความแข็งแรงดึง และการต้านทานน้ำเพิ่มมากขึ้น

M.B. Fernanda, T.H.S Costa and D.L. Carvalho [10] ได้ศึกษาผลของการปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยไม้ที่ได้จากเยื่อไม้ของต้นสน (Aspen) ที่มีต่อสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตระหว่างเส้นใยสนกับเมทริกซ์ที่เป็นพอลิพรอพิลีนหรือ MAPP นอกจากนี้ยังศึกษาสภาวะที่เหมาะสมที่ใช้ในการผสมเพื่อเตรียมพลาสติกคอมโพสิตโดยทำการผสม PP และเส้นใยสนที่อุณหภูมิต่าง ๆ คือ 170 180 และ 190 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 และ 15 นาที ความเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที ทำการปรับปรุงพื้นผิวของเส้นใยไม้ด้วยสารคู่ควบ Silane โดยมีชนิดของสารคู่ควบ Silane ปริมาณสารคู่ควบ Silane และกระบวนการเคลือบบนพื้นผิวของเมทริกซ์ของ PP หรือ MAPP ที่แตกต่างกัน จากผลการทดลองพบว่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิและเวลาในการผสมที่เหมาะสม คือ 180 องศาเซลเซียสและ 10 นาที ตามลำดับ ในขณะที่การปรับปรุงสภาพผิวเส้นใยไม้ด้วยสารคู่ควบ Silane ชนิด A-172 ในปริมาณ 4% โดยน้ำหนักที่เคลือบด้วย MAPP 2 % w/v และปริมาณเส้นใยไม้ที่ 10 % w/w ให้ค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดุลัส และค่าความทนทานต่อการโค้งงอสูงที่สุด

A.A.S. Curvelo, A.J.F. de Carvalho and J.A.M. Agnelli [11] ได้ทำการศึกษาสมบัติของวัสดุประกอบแบ่งเทอร์โมพลาสติกที่ทำจากแป้งข้าวโพด โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซออร์ และเสริมแรงด้วยเส้นใยฟอกขาวจากเยื่อของต้นยูคาลิปตัส เตรียมวัสดุประกอบโดยทำการผสมแป้งข้าวโพด กลีเซอรอล และเส้นใยเซลลูโลสชนิดสั้น (16%โดยน้ำหนัก) จากเยื่อฟอกขาว ด้วยเครื่องผสมระบบปิดที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส จากนั้นนำของผสมที่ได้ไปขึ้นรูปร้อนให้เป็นแผ่นหนา 2-3 มิลลิเมตร นำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ สมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน สัณฐานวิทยา และการดูดซับน้ำ พบว่า วัสดุประกอบมีค่าความแข็งแรงดึงสูงขึ้น 100% และมีค่ามอดุลัสสูงขึ้นกว่า 50% เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุที่ไม่มีเสริมแรง การทดสอบทางสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิคกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด พบว่าเส้นใยและเมทริกซ์ของแป้งมีการยึดเกาะกันที่ดี

L. Averous, C. Fringant and L. Moro [12] ได้ศึกษาเกี่ยวกับอันตรกิริยาระหว่างเส้นใยเซลลูโลสจากไม้ใบ (Leafwood) และแป้งสาลีที่มีอะมิโลส 26% และอะมิโลเพกทิน 74% โดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซออร์ และใช้ LDPE เป็นวัสดุอ้างอิง (ไม่มีอันตรกิริยาระหว่างเส้นใยและพอลิเมอร์เมทริกซ์) สมบัติเชิงกล สมบัติเชิงกลความร้อน (DMTA) และสัณฐานวิทยา (SEM) ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ได้รับการทดสอบหลังจากผ่านกระบวนการขึ้นรูปแบบอัดรีดและอัดฉีดผลการทดสอบสมบัติเชิงกลความร้อนพบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีอุณหภูมิรีแลกเซชัน(Relaxation temperature) หลักเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลจากอันตรกิริยาระหว่างเซลลูโลสและแป้ง ทำให้สายโซ่โมเลกุลของแป้งมีการเคลื่อนที่น้อยลง ผลการทดสอบเชิงกลพบว่า TPS ที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยมีค่ามอดุลัสเพิ่มขึ้นอย่างมาก ผลการทดสอบทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิว TPS ที่อุณหภูมิต่ำพบว่าเส้นใยฝังตัวอยู่ในเมทริกซ์ของ TPS ส่งผลให้การหดตัวลดลงเนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างเมทริกซ์ที่เป็นคาร์โบไฮเดรตกับเส้นใยเซลลูโลส

H. D. Rozman, B. K. Kon, A. Abusamah, R. N. Kumar and Z. A. Mohd. Ishak [13] ได้ศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (High-Density Polyethylene, HDPE) และไม้ยางพารา โดยเปรียบเทียบระหว่างการใช้ผงไม้และเส้นใยไม้ในการทำคอมโพสิต ปริมาณไม้ที่ใช้ในการศึกษา คือ 20 30 และ 40 % นอกจากนี้ได้ปรับปรุงสมบัติเชิงกลของคอมโพสิต โดยการใช้สารคู่ควบ (Coupling agent) ซึ่งได้มีการเปรียบเทียบสารคู่ควบ 2 ชนิด ระหว่าง 3-(Trimethoxysilyl) propyl methacrylate (TPM) และ 3-Aminopropyltriethoxysilane (APE) ปริมาณที่ใช้ในการศึกษา คือ 1, 3 และ 5% โดยเปรียบเทียบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับปริมาณผงไม้ที่ใช้ จากผลการทดลองพบว่าสมบัติเชิงกลของคอมโพสิตที่ใช้ผงไม้และเส้นใยไม้มีค่ามอดูลัสการแตกหัก (Modulus of rupture) และมอดูลัสการดึงยึด (Tensile modulus) ที่สูงขึ้นเมื่อปริมาณไม้มากขึ้น และพบว่าคอมโพสิตที่ได้จากผงไม้ให้ค่าที่สูงกว่าการใช้เส้นใยไม้ เนื่องจากผงไม้สามารถกระจายตัวในเมทริกซ์ได้ดีกว่าเส้นใยซึ่งมักเกิดการรวมตัวเป็นมัดเส้นใยที่มีขนาดใหญ่ ทำให้กระจายตัวในเมทริกซ์ได้ไม่ดี ส่วนค่าความแข็งแรงกระแทก (Impact strength) ค่าความแข็งแรงดึง และร้อยละการดึงยึด ณ จุดขาด มีค่าลดลงเป็นลำดับ เมื่อเติมผงไม้หรือเส้นใยไม้ในปริมาณที่มากขึ้น จากผลการทดลองเมื่อเติมสารคู่ควบพบว่า คอมโพสิตที่ใช้ TPM เป็นสารคู่ควบมีค่ามอดูลัสการดึงยึดต่ำลง แต่มีร้อยละการดึงยึด ณ จุดขาดสูงขึ้น ทั้งในคอมโพสิตจากผงไม้และเส้นใยไม้ ส่วนคอมโพสิตที่ใช้ APE เป็นสารคู่ควบ พบว่า คอมโพสิตที่ทำจากผงไม้มีค่าความแข็งแรงดึงและมอดูลัสการดึงยึดสูงขึ้น สำหรับความแข็งแรงกระแทกมีค่าลดลงเมื่อมีปริมาณผงไม้หรือเส้นใยมากขึ้นและเมื่อใช้ TPM เป็นสารคู่ควบในคอมโพสิตที่ทำจากเส้นใยไม้พบว่าค่าความแข็งแรงกระแทกมีค่าสูงขึ้น

X. Ma, J. Yu and J. F. Kennedy [14] ได้ศึกษาเกี่ยวกับสมบัติของคอมโพสิตแข็งเทอร์โมพลาสติก (TPS) ที่ทำจากแป้งข้าวโพด โดยมีการเสริมแรงด้วยเส้นใย Winceyette ยาว 12 มิลลิเมตร (5% 10% 15% และ 20%) โดยให้ยูเรียฟอรัมาไมด์เป็นพลาสติกไซเซออร์ เพื่อยับยั้งการคืนรูป (Retrogradation) ของแป้ง ผลจากการทดสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) แสดงถึงการกระจายและตัวการยึดเกาะที่ดีระหว่างแป้งกับเส้นใย ทำการศึกษาผลของปริมาณของเส้นใยและน้ำที่มีต่อสมบัติเชิงกลของ TPS พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยจาก 0 ถึง 20% ทำให้ค่าความแข็งแรงดึงเริ่มต้นเพิ่มขึ้นถึง 15 MPa ในขณะที่ค่าการดึงยึดลดลงจาก 105% เหลือ 19% และการที่มีปริมาณน้ำเพิ่มมากขึ้นทำให้ผลจากการเสริมแรงค่อยๆ ลดลง แต่ในกรณีที่มีน้ำอยู่มากกว่า 30% ทำให้ปริมาณของน้ำและเส้นใยไม่มีผลกระทบต่อสมบัติเชิงกล คอมโพสิตแข็งเทอร์โมพลาสติกที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใย มีความเสถียรทางความร้อนและความทนทานต่อความชื้นเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน และจากการทดสอบด้วยเครื่องเอกซเรย์ชนิดหักเห (X-rays Diffractometer) แสดงให้เห็นว่าเมทริกซ์ของ TPS ที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยธรรมชาติ โดยให้ยูเรียฟอรัมาไมด์เป็นพลาสติกไซเซออร์สามารถยับยั้งการคืนรูป (Retrogradation) ของแป้งได้ถึงแม้จะมีปริมาณของเส้นใยน้อยกว่า 20%

A.L. Da RÓz, A.J.F. Carvalho, A. Gandind and A.A.S. Curvelo [15] ได้ศึกษาผลของชนิดและปริมาณพลาสติกไซเซออร์ที่มีต่อสมบัติเชิงกล สมบัติทางความร้อน และการดูดซับน้ำของแป้งเทอร์โมพลาสติกที่ทำจากแป้งข้าวโพด โดยผ่านกระบวนการขึ้นรูปเหลวโดยทำการผสมแป้งเข้ากับพลาสติกไซเซออร์ (กลีเซอรอล) ด้วยเครื่องผสมที่มีลูกกลิ้งหมุนด้วยความเร็ว 60 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 6 นาที จากนั้นทำให้เป็นแผ่นหนา 1 และ 2 มิลลิเมตร นำชิ้นงานที่ได้ไปทดสอบสมบัติต่าง ๆ ได้แก่ สมบัติเชิงกล ลักษณะทางกายภาพ ความเป็นผลึก สมบัติทางความร้อน และการเอกซเรย์เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดูดซับน้ำ จากการศึกษาพบว่า ชนิดและปริมาณพลาสติกไซเซออร์ไม่มีผลกระทบต่อความเป็นผลึกของชิ้นงานที่ได้ แต่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของชิ้นงานใน 2 ทางที่ตรงข้ามกัน คือ ชิ้นงานที่ได้มีความอ่อนนุ่มเนื่องจากการหลอ่ลื่นในส่วนที่เป็นอสัณฐาน และชิ้นงานมีความแข็งในส่วนที่ไม่มีการหลอ่ลื่น

M. Thuwall, A. Boldizar and M. Rigdahl [16] ได้ศึกษากระบวนการอัดรีดเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งมันฝรั่งที่มีอะมิโลสเป็นองค์ประกอบอยู่มาก โดยทำการผสมแป้งมันฝรั่งที่มีปริมาณอะมิโลสอยู่มาก (Native high amylose potato starch) กับแป้งมันฝรั่งธรรมดา ในอัตราส่วนแป้งมันฝรั่งต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 100:45 และ 100:30 ด้วยเครื่องอัดรีด โดยมีการควบคุมปริมาณน้ำและความชื้นสัมพัทธ์ที่แตกต่างกัน ที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส เมื่อทำการผสมแล้วนำมาอัดรีดให้เป็นแผ่นด้วยเครื่องบราเบนเดอร์ (Brabender) ทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ ปริมาณความชื้นของชิ้นงาน ความหนืดคาพิลลารีของพอลิเมอร์หลอมเหลว สมบัติเชิงกล และความเป็นผลึกของชิ้นงาน พบว่าเทอร์โมพลาสติกที่ได้จากแป้งมันฝรั่งที่มีปริมาณอะมิโลสอยู่มาก มีค่าความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลวสูงกว่าเทอร์โมพลาสติกที่ได้จากแป้งมันฝรั่งธรรมดา ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 53% และเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำจาก 27% ไปจนถึง 30% โดยน้ำหนัก เทอร์โมพลาสติกที่ได้จากแป้งมันฝรั่งที่มีปริมาณอะมิโลสอยู่มาก มีค่าความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลวมีค่าลดลงเท่ากับค่าความหนืดของพอลิเมอร์หลอมเหลวของเทอร์โมพลาสติกที่ได้จากแป้งมันฝรั่งธรรมดาที่มีปริมาณน้ำอยู่ 28% โดยปกติแล้วแป้งที่มีปริมาณอะมิโลสอยู่มาก ทำการอัดรีดได้ยากกว่าแป้งธรรมดา ปัญหาหลักในการอัดรีดแป้งที่มีปริมาณอะมิโลสอยู่มาก คือ ความไม่เสถียรของการไหล เมื่อหลอมไม่มากพอ แป้งมักติดอยู่ภายในหัวตาย ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยเพิ่มปริมาณน้ำและเพิ่มแรงกดอัดและเพิ่มความเร็วรอบของสกรู อย่างไรก็ตาม พบว่ามีเพียงอัตราส่วนของแป้งต่อกลีเซอรอลเท่ากับ 100:45 เท่านั้นที่ให้ผลการอัดรีดที่สามารถยอมรับได้ ชิ้นงานแผ่นที่ได้จากการอัดรีดแป้งที่มีปริมาณอะมิโลสอยู่มาก มีค่าแรงสูงสุดที่ทำให้ชิ้นงานขาด เท่ากับ 5 MPa ที่อุณหภูมิห้องและมีความชื้นสัมพัทธ์ 53% ในขณะที่แป้งธรรมดามีค่า 3 MPa และแป้งที่มีปริมาณอะมิโลสอยู่มากมีค่าการดึงยืด ณ จุดขาดที่มากกว่า

R. Shi, Q. Liu, T. Ding, Y. Han, L. Zhang, D. Chan and W. Tian [17] ได้ศึกษาถึงการยืดอายุการใช้งานของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ทำจากแป้งข้าวโพดที่มีน้ำอยู่ 12% โดยน้ำหนัก โดยการหลอมของผสมเข้ากับกลีเซอรอลในปริมาณแตกต่างกันที่ 30, 40, 50 และ 60% โดยน้ำหนัก ภายใต้อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสและความชื้นสัมพัทธ์  $50 \pm 5\%$  เมื่อทำการทดสอบในระยะเวลา 3 เดือน จากผลการทดสอบ XRD พบว่า เมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้นช่วยให้โครงสร้างแบบเกลียวเดี่ยว (Single helix structure) เกิดได้มากขึ้นด้วย แต่จำกัดการเกิดโครงสร้างแบบเกลียวคู่ (Double helix structure) และผลการทดสอบทางความร้อน DMTA พบว่าอุณหภูมิที่ตั้งค่าเหนือสถานะทรานซิชัน (Onset temperature of upper transition) ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซเพิ่มขึ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างรวดเร็วเมื่อมีปริมาณกลีเซอรอลไม่มากนัก และสมบัติเชิงกเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ เมื่อมีปริมาณกลีเซอรอลมากกว่า 40% โดยน้ำหนัก ผลจากการวัด FTIR ยังสามารถแสดงถึงความเร็วของการเคลื่อนที่ของพีค Hydroxyl group stretching ที่เกิดได้ช้าลง เมื่อปริมาณกลีเซอรอลเพิ่มขึ้น และยังพบว่าการแยกตัวภาคมากขึ้นเรื่อย ๆ ในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช นอกจากนี้ยังมีการดูดซับของน้ำ ที่พบว่าปริมาณน้ำมากขึ้นพร้อม ๆ กับปริมาณกลีเซอรอลที่เพิ่มขึ้นด้วย ทำให้สามารถสรุปได้ว่าการเติมกลีเซอรอลในปริมาณมากช่วยยืดอายุการใช้งานของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 สารเคมี

1. แป้งข้าวเจ้าตราใบหยก ชนิดไม่น้ำตาลพิเศษ จากบริษัทบางกอกอินเตอร่าฟู๊ด จำกัด องค์ประกอบของแป้งข้าวเจ้าแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบของแป้งข้าวเจ้า

รายละเอียด	ผลวิเคราะห์
ความชื้น	11.50-13.00%
ความแห้ง	86.90-88.05%
ไขมัน	0.25%
เถ้า	0.23%
โปรตีน	6.50-7.00%
ขนาด	ไม่เกิน 160 ไมครอน
ความเป็นกรด-ด่าง	6.0-7.0

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

2. กลีเซอรอล (Glycerol) เกรดการค้า จากบริษัท Lab System
3. กรดสเตียริก จากบริษัท Lab System
4. เส้นใยฝ้าย
5. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low Density Polyethylene, LDPE) สมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สมบัติของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เกรด LD1905F จากบริษัทไทยโพลีเอทิลีน จำกัด

สมบัติทั่วไป	หน่วย	ค่าที่ได้	วิธีการทดสอบ
อัตราการไหล (Melt flow rate)	g / 10 min	5.2	ASTM D1238
ความหนาแน่น (Density)	g / cm <sup>3</sup>	0.919	ASTM D 1505
จุดหลอมเหลว (Melting point)	°C	110	ASTM D 2117

หมายเหตุ ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

6. น้ำมันซิลิโคน (Silicone oil)

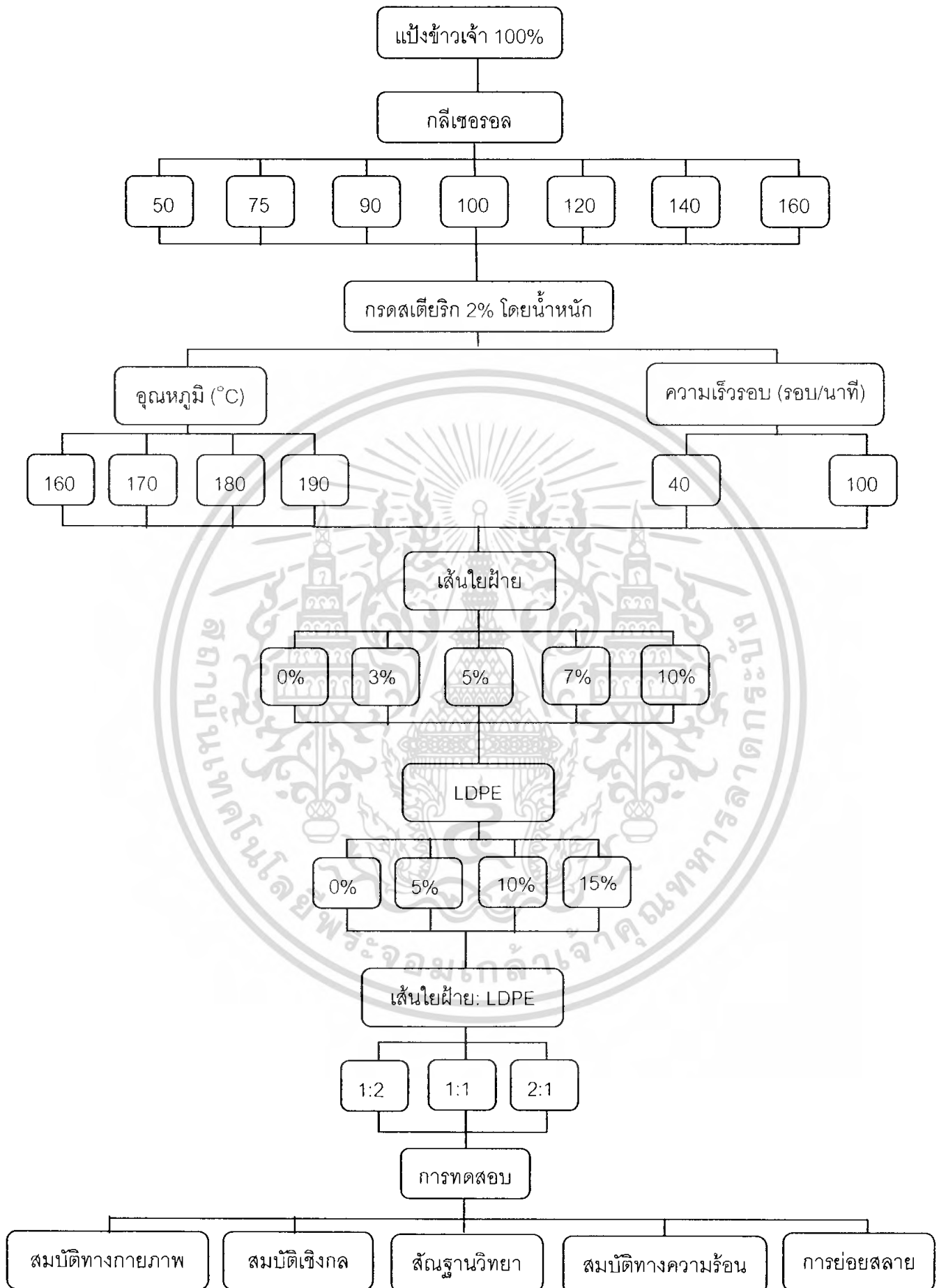
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 อุปกรณ์

1. เครื่องผสมความเร็วสูง (High-speed mixer)
2. เครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer)
3. เครื่องอัดขึ้นรูป (Compression Molding)
4. เครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (Universal Testing Machine)
5. เครื่องทดสอบความแข็งกด (Durometer Hardness แบบ Shore D)
6. เครื่องชั่งแบบละเอียด (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง)
7. แผ่นเปลวอลูมิเนียม (Aluminium Foil)
8. แม่พิมพ์หนา 2 มิลลิเมตร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนการวิจัย ตีให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การทดลอง

ตอนที่ 1 การหาภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชจากแป้งข้าวเจ้า

- 3.3.1.1 ทำการชั่งน้ำหนักแป้ง กลีเซอรอล และกรดสเตรียริก ใส่ลงในภาชนะ ตามอัตราส่วนที่แสดงในตารางที่ 3.3
- 3.3.1.2 นำแป้ง กลีเซอรอล และกรดสเตรียริก ที่เตรียมได้มาทำการผสมโดยใช้เครื่องผสมความเร็วสูง เป็นเวลา 3 นาที
- 3.3.1.3 เก็บของผสมที่ได้ในภาชนะที่ปิดสนิทเป็นเวลา 1 คืน เพื่อให้กลีเซอรอลซึมเข้าไปในแป้ง หลังจากนั้นนำของผสมที่เตรียมได้มาทำการผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) ที่อุณหภูมิต่างๆ ดังนี้ 160 170 180 และ 190 องศาเซลเซียส และที่ความเร็วรอบ 40 และ 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที สังเกตลักษณะทางกายภาพของของผสมที่ได้
- 3.3.1.4 เลือกอุณหภูมิและความเร็วรอบในการผสมที่เหมาะสมที่สุดโดยพิจารณาจากลักษณะทางกายภาพของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชที่ได้ซึ่งควรจะมีลักษณะเป็นขึ้นหรือก้อนพันติดกันรวมถึงพิจารณาจากสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชที่เตรียมได้

ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนของแป้ง กลีเซอรอลและกรดสเตรียริกที่ใช้ในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสไตร์ช

แป้งข้าวเจ้า (phr)	กลีเซอรอล (phr)	กรดสเตรียริก (%wt.)
100	50	2
100	75	2
100	100	2
100	120	2
100	140	2
100	160	2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ตอนที่ 2 การขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งข้าวเจ้า

- 3.3.2.1 นำเทอร์โมพลาสติกสตาโรลแต่ละสูตรที่ได้จากการผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิด (Internal mixer) มาอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อทำการไล่น้ำหรือความชื้นออกจากพอลิเมอร์
- 3.3.2.2 ทำการขึ้นรูปเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ได้ด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป (Compression Molding) โดยใช้แม่พิมพ์ที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร ทำความสะอาดแม่พิมพ์แล้วทาน้ำมันซิลิโคน (Silicone oil) ลงไปบนแม่พิมพ์ด้านที่มีการสัมผัสกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรล
- 3.3.2.3 ใส่เทอร์โมพลาสติกสตาโรลลงในแม่พิมพ์ ประกอบแม่พิมพ์เข้าด้วยกัน จากนั้นนำแม่พิมพ์ไปใส่ในเครื่องอัดขึ้นรูป ทำการขึ้นรูปชิ้นงานที่อุณหภูมิเดียวกันกับอุณหภูมิที่ใช้ในการผสมเทอร์โมพลาสติกสตาโรล (170 180 และ 190 องศาเซลเซียส) และใช้ความดันในช่วง 1300 psi เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นทำการหล่อเย็นต่ออีก 5 นาที
- 3.3.2.4 นำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ แล้วนำไปตัดเป็นรูปดัมเบลล์เพื่อใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลต่อไป

## ตอนที่ 3 การปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งข้าวเจ้า

- 3.3.3.1 ทำการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เตรียมได้ ในตอนที่ 2 โดยใช้เส้นใยฝ้ายในปริมาณ 3% 5% 7% และ 10% เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักของเทอร์โมพลาสติกสตาโรล
- 3.3.3.2 ทำการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เตรียมได้ ในตอนที่ 2 โดยใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในปริมาณ 5% 10% และ 15% เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักของเทอร์โมพลาสติกสตาโรล
- 3.3.3.3 ทำการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เตรียมได้ โดยใช้เส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในอัตราส่วน 1:1 1:2 และ 2:1 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 วิธีการทดสอบ

#### 3.4.1 การทดสอบสมบัติเชิงกล

ทำการทดสอบสมบัติต่างๆ ตามมาตรฐาน ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 มาตรฐานที่ใช้ในการทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ที่เตรียมได้ [18]

สมบัติ	มาตรฐานที่ใช้ทดสอบ	หน่วยที่รายงาน
แรงดึง(Load)	ASTM D 638	N
ความแข็งแรงดึง(Tensile strength)	ASTM D 638	MPa
มอดุลัส(Young's modulus, E)	ASTM D 638	MPa
การดึงยืด(Elongation)	ASTM D 638	mm
เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (% Strain at break)	ASTM D 638	%
ความแข็งกด(Hardness)	ASTM D 638	Shore A

##### 3.4.1.1 แรงดึง ความแข็งแรงดึง มอดุลัส การดึงยืด และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด

ทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบสมบัติเชิงกล (Universal Testing Machine) โดยทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 638 พร้อมทั้งใช้โปรแกรม WINDAP ซึ่ในงานที่ใช้ในการทดสอบจะมีลักษณะเป็นรูปดัมเบลล์ จำนวน 10 ชิ้นงาน ต่อ 1 สูตร โดยทำการควบคุมสภาวะของชิ้นงานที่จะใช้ทดสอบ ที่อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 60%ทดสอบตามสภาวะดังนี้

Test speed : 40 mm/min

Gauge length : 25 mm

Load cell : 100 N

ค่าความแข็งแรงดึง มอดุลัส และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

ความแข็งแรงดึง (Tensile strength) =  $F/A$

มอดุลัส (Young's modulus, E) =  $(F/A) / [(L-L_0)/L_0]$

เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (% Elongation at break) =  $[(L-L_0)/L_0] * 100$

เมื่อ F คือ แรงที่ใช้ดึงยืดชิ้นงานตัวอย่าง (N)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานตัวอย่าง ( $\text{mm}^2$ )

L คือ ระยะห่างระหว่างจุดสองจุดหลังทำการดึงยึดชิ้นงานตัวอย่าง (mm)

$L_0$  คือ ระยะที่ชิ้นงานตัวอย่างแคบที่สุดและมีพื้นที่หน้าตัดขนานกัน (mm)

### 3.4.1.2 ความแข็งกด (Hardness)

วัดความแข็งของชิ้นงาน ตามมาตรฐาน ASTM D638 ด้วย Durometer Hardness ชนิด Shore A โดยตัวอย่างที่ใช้ทดสอบจะต้องมีความหนาอย่างน้อย  $\frac{1}{4}$  นิ้ว หรือ 0.25 นิ้ว ทำการทดสอบหาค่าความแข็งแรงกดตัวอย่างละ 10 จุด สเกลสำหรับอ่านค่าความแข็งกดอยู่ในช่วง 0-100 โดยค่าความแข็งกด 0 คือ ความแข็งกดของของเหลว และค่าความแข็งกด 100 คือความแข็งของวัสดุที่แข็งมากไม่ยุบตัว เช่น กระจก

### 3.4.2 การทดสอบทางกายภาพ

#### 3.4.2.1 การดูดซับน้ำ (Water absorption) [15]

ทำการอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง นำแบ่งมาชั่งน้ำหนัก (ภายใต้สภาวะนี้การระเหยของพลาสติไซเซอร์จะยังไม่เกิดขึ้น) จากนั้นนำมาเก็บไว้ในที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 50% โดยเก็บตัวอย่างในภาชนะปิดที่บรรจุด้วยแคลเซียมคลอไรด์ ( $\text{CaCl}_2$ ) เป็นเวลา 5 วัน แล้วทำการชั่งน้ำหนักภายหลังจากดูดซับน้ำ โดยสามารถคำนวณหาปริมาณน้ำได้จาก

$$W_a = ((W_e - W_0) / W_0) * 100$$

เมื่อ  $W_a$  คือ เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ

$W_e$  คือ น้ำหนักหลังการดูดซับน้ำ

$W_0$  คือ น้ำหนักก่อนการดูดซับน้ำ

#### 3.4.3 การทดสอบสัณฐานวิทยา

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ใช้ในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิต่ำ (Cryogenic fracture) ทำการเตรียมตัวอย่างที่ได้โดยนำชิ้นงานตัวอย่างมาแช่ในไนโตรเจนเหลว (Liquid nitrogen) และทำการหักทันที หลังจากนั้นนำมาเคลือบด้วยทองและนำเข้าเครื่อง SEM ต่อไป โดยทำการศึกษาการกระจายตัวของเส้นใยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในเทอร์โมพลาสติคสตาร์ช รวมถึงศึกษาสัณฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติคสตาร์ชก่อนและหลังการทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.4 การทดสอบสมบัติทางความร้อน

ศึกษาอุณหภูมิการสลายตัว (Onset temperature) ของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลด้วยเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric analyzer, TGA) ทำได้โดยชั่งสารตัวอย่างประมาณ 16 มิลลิกรัม แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง TGA โดยใช้บรรยากาศไนโตรเจน ( $N_2$ ) ที่ภาวะในการทดสอบ คือ อุณหภูมิที่ใช้ในช่วง 50-600 องศาเซลเซียส และมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ (Heating rate) ที่ 10 องศาเซลเซียส/นาที เมื่อได้ TGA เทอร์โมแกรมแล้ว จึงนำมาทำอนุพันธ์ของเทอร์โมแกรม (Derivative thermogram) ได้เป็น DTG

### 3.4.5 การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดิน [19]

ตัดวัสดุที่ต้องการทดสอบเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 20x50 มิลลิเมตร ฝังในดินลึกประมาณ 10 เซนติเมตร โดยควบคุมความชื้นในดินให้อยู่ในช่วง 20-30% การเก็บตัวอย่างต้องทำด้วยระมัดระวังเนื่องจากตัวอย่างจะกระจายไปกับดิน ทำการเปรียบเทียบน้ำหนักเทอร์โมพลาสติกสตาบิลที่ลดลงในแต่ละวัน เป็นระยะเวลา 7 วัน

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเตรียมและทดสอบสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้าโดยมีกลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ ในอัตราส่วน 1 : 1 โดยทำการศึกษาอุณหภูมิและความเร็วรอบที่เหมาะสมในการผสมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชด้วยเครื่องผสมระบบปิด ศึกษาปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชโดยใช้เส้นใยฝ้ายหรือพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยเลือกศึกษาถึงปริมาณที่เหมาะสมของเส้นใยฝ้ายที่ใช้ในการเสริมแรง ปริมาณที่เหมาะสมของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และอัตราส่วนที่เหมาะสมของเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ โดยศึกษาจากสมบัติเชิงกล สันฐานวิทยา สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อนและการย่อยสลายด้วยการฝังดิน

จากการศึกษาสมบัติต่างๆ ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมได้ ให้ผลดังนี้

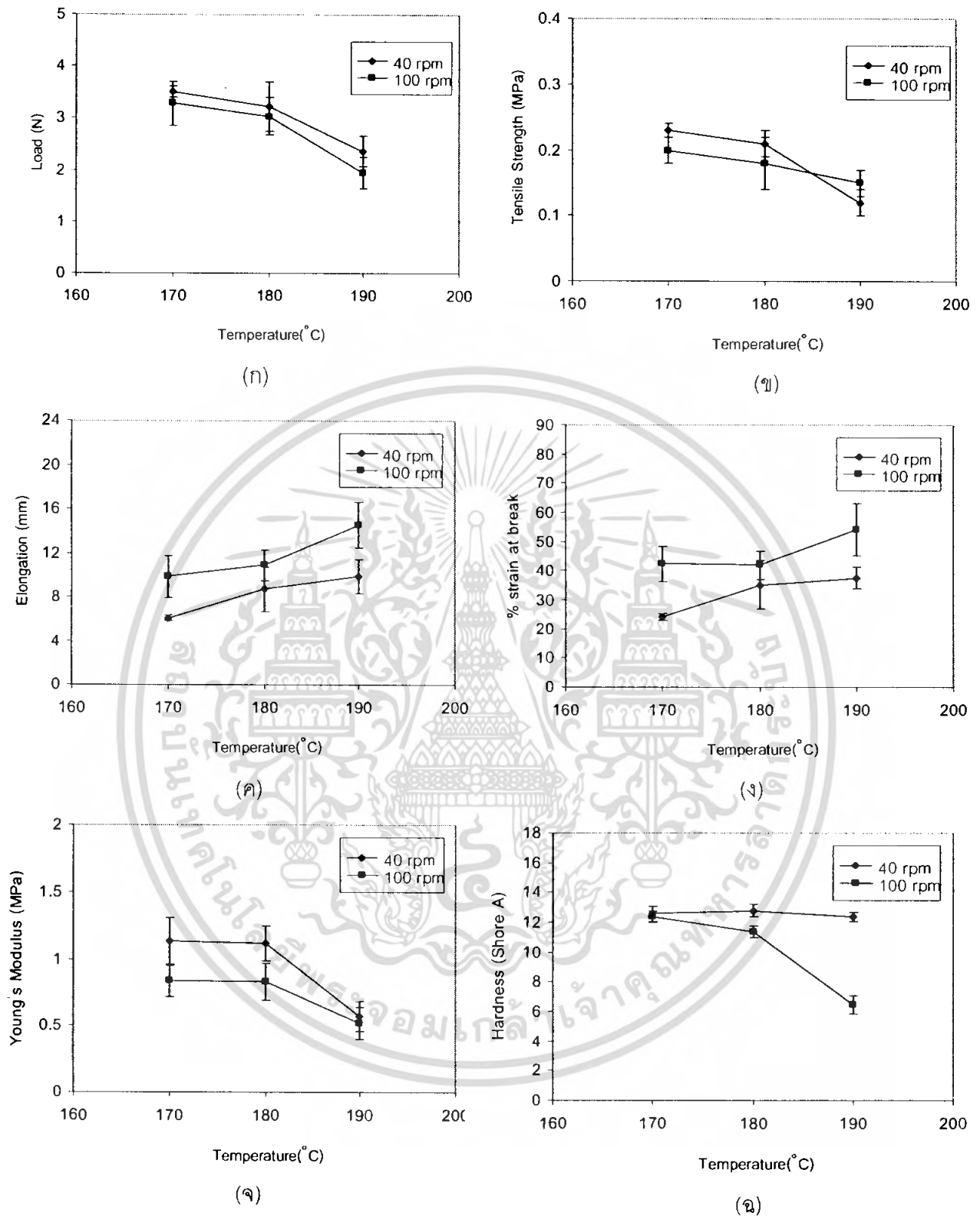
#### 4.1 สมบัติเชิงกล

สมบัติเชิงกลที่ทำการศึกษา ได้แก่ แรงดึง ความแข็งแรงดึง มอดุลัส การดึงยืด เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด และความแข็งกด ให้ผลการทดลองดังนี้

##### 4.1.1 การศึกษาผลของอุณหภูมิและความเร็วรอบที่เหมาะสมในการผสมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชด้วยเครื่องผสมระบบปิด

ผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมได้จากแป้งข้าวเจ้าผสมกลีเซอรอล ในอัตราส่วน 1:1 ด้วยเครื่องผสมระบบปิดที่ความเร็วรอบ 40 และ 100 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 160 170 180 และ 190 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่า เมื่อใช้อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เตรียมได้มีลักษณะเป็นอนุภาค ไม่รวมกันเป็นกลุ่มก้อน ไม่สามารถนำไปศึกษาต่อได้ ดังนั้นจึงทำการศึกษาถึงผลของอุณหภูมิที่ 170 180 และ 190 องศาเซลเซียส ซึ่งให้ผลการทดลองดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้าที่อุณหภูมิและความเร็วรอบต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

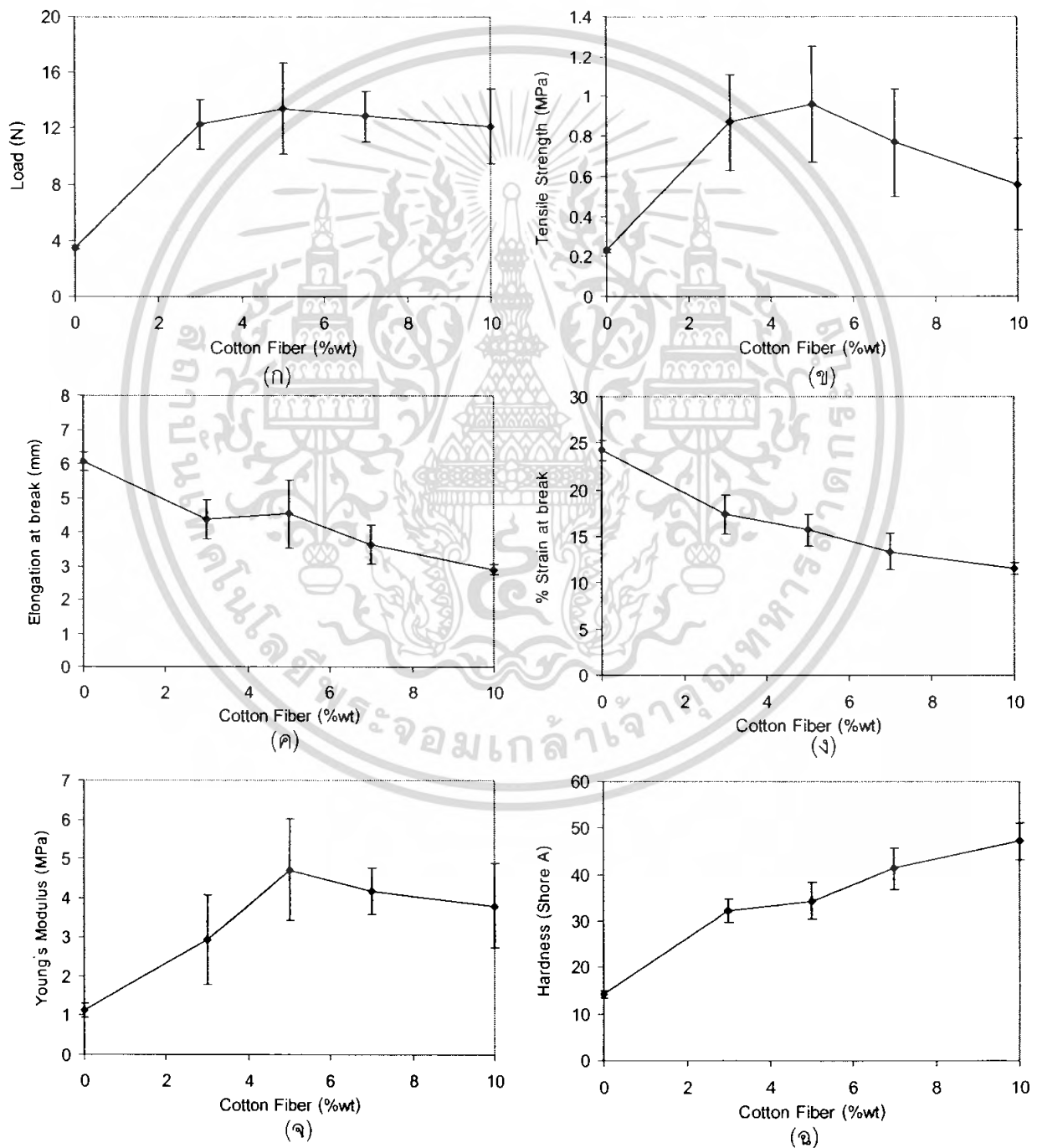
จากรูปที่ 4.1 (ก)-(ค) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึง ความแข็งแรงดึง การดึงยืด เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด มอดุลัส และความแข็งแรงดของเทอร์โมพลาสติกศาสตร์จากแป้งข้าวเจ้าผสมกลีเซอรอลด้วยเครื่องผสมระบบปิดที่ความเร็วรอบ 40 และ 100 รอบ/นาที ที่อุณหภูมิต่างๆ กัน พบว่าแป้งข้าวเจ้าผสมกลีเซอรอลที่ความเร็วรอบ 40 รอบ/นาที มีค่าแรงดึง ความแข็งแรงดึง มอดุลัส และความแข็งแรงดสูงกว่าที่ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาที ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากการผสมที่ความเร็วรอบ 100 รอบ/นาที ทำให้เกิดแรงเฉือนมาก อาจเกิดการขาดของสายโซ่ ทำให้สายโซ่โมเลกุลของแป้งสั้นลงสามารถเคลื่อนหลุดจากกันได้ง่ายขึ้นเมื่อให้แรงกระทำ ส่งผลให้มีค่าการดึงยืดซึ่งหมายถึงระยะที่พอลิเมอร์ยืดออกเมื่อได้รับแรงกระทำ และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดสูงกว่าที่ความเร็วรอบ 40 รอบ/นาที ต่างจากค่าแรงดึง ความแข็งแรงดึง มอดุลัส และความแข็งแรงด ซึ่งเป็นค่าที่แสดงความแข็งของวัสดุ หรือความสามารถในการรับแรงต่อการเปลี่ยนรูปหรือการเสียหายของวัสดุ โดยให้ผลในทางกลับกัน

จากรูปที่ 4.1 (ก) พิจารณาผลเนื่องจากอุณหภูมิเมื่อทำการผสมที่ความเร็วรอบ 40 รอบ/นาที พบว่าเทอร์โมพลาสติกศาสตร์จากแป้งข้าวเจ้าผสมกลีเซอรอลให้แรงดึงสูงสุดเมื่อผสมที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส แต่เมื่อผสมที่อุณหภูมิให้สูงขึ้นเป็น 180 และ 190 องศาเซลเซียส ยิ่งเป็นการเพิ่มแรงเฉือนให้มากขึ้น การขาดของสายโซ่จึงมีมากขึ้น ทำให้สามารถเปลี่ยนรูปได้ง่ายเมื่อให้แรงกระทำ ดังนั้นค่าแรงดึง (รูปที่ 4.1 (ก)) จึงมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการผสม เช่นเดียวกับความแข็งแรงดึง (รูปที่ 4.1 (ข)) มอดุลัส (รูปที่ 4.1 (จ)) และค่าความแข็งแรงด (รูปที่ 4.1 (ฉ)) แต่พบว่าการดึงยืด (รูปที่ 4.1 (ค)) และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (รูปที่ 4.1 (ง)) กลับมีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากสายโซ่สามารถเคลื่อนหลุดออกจากกันได้ง่ายนั่นเอง

จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกศาสตร์จากแป้งข้าวเจ้าผสมกลีเซอรอลพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการผสมทำให้สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกศาสตร์จากแป้งข้าวเจ้าผสมกลีเซอรอลเปลี่ยนไปอย่างชัดเจน แสดงว่าอุณหภูมิมิมีผลต่อสมบัติเชิงกลมากกว่าความเร็วรอบ และภาวะการผสมที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบ 40 รอบ/นาที ให้ค่าแรงดึง ความแข็งแรงดึง มอดุลัส และความแข็งแรงดสูงสุด จึงกำหนดให้เป็นภาวะที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกศาสตร์ที่มีการเสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้าย และพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นต่ำต่อไป

#### 4.1.2 การศึกษาการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้า โดยใช้เส้นใยฝ้ายเป็นส่วนเสริมแรง

เนื่องจากเส้นใยฝ้ายเป็นเส้นใยธรรมชาติที่มีอยู่ทั่วไปในปริมาณมาก อีกทั้งมีการจัดเรียงตัวที่ดี ส่งผลให้เส้นใยฝ้ายมีความแข็งแรง เหนียว สามารถรับแรงได้ดีในแนวเส้นใย ดังนั้นเส้นใยฝ้าย จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นส่วนเสริมแรงในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จากการทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีเส้นใยฝ้ายที่มีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (L/D ratio) ของเส้นใยเท่ากับ 500:1 ผลมอยู่ในปริมาณ 0% 3% 5% 7% และ 10 % โดยน้ำหนัก ให้ผลการทดลองดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 4.2 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ทำการผสมด้วยเส้นใยฝ้าย  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.2 (ก)-(จ) แสดงสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เติมเส้นใยฝ้ายในปริมาณที่แตกต่างกัน พบว่า แรงดึง (รูปที่ 4.2 (ก)) ความแข็งแรงดึง (รูปที่ 4.2 (ข)) และมอดุลัส (รูปที่ 4.2 (จ)) ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นและมีค่าสูงสุดที่ปริมาณเส้นใยฝ้าย 5% โดยน้ำหนัก เนื่องจากเส้นใยฝ้ายมีความแข็งแรง มีมอดุลัสสูงกว่าเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช และสามารถทนแรงดึงตามแนวแกนของเส้นใยได้ดีเนื่องจากสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซีของแป้งข้าวเจ้าและเส้นใยฝ้ายได้ ทำให้ผสมเข้ากันได้ดี นอกจากนี้โครงสร้างของแป้งข้าวเจ้าและเส้นใยฝ้ายมีลักษณะที่คล้ายกัน กล่าวคือมีความมีขั้ว จึงทำให้เกิดความเข้ากันได้ ซึ่งพิจารณาได้จากหลักฐานวิทยาของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่เติมเส้นใยฝ้าย 5% (รูปที่ 4.7) อีกทั้งเส้นใยฝ้ายยังมีอัตราส่วนระหว่างความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (Aspect ratio) ที่สูง เมื่อมีแรงกระทำเส้นใยจะช่วยกระจายแรงหรือส่งผ่านแรงนั้นไปตามความยาวของเส้นใย เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมเส้นใยฝ้ายจึงสามารถรับและกระจายแรงได้ดีขึ้น แต่เมื่อทำการผสมเส้นใยฝ้ายลงไปปริมาณมากขึ้น ทำให้สมบัติเชิงกลมีแนวโน้มลดลงโดยแรงดึง ความแข็งแรงดึง และมอดุลัส ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเริ่มมีแนวโน้มลดลงเมื่อใส่เส้นใยฝ้ายลงไป 7% โดยน้ำหนัก เนื่องจากมีเส้นใยในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้มีการแยกวัฏภาคเกิดเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงานที่บริเวณรอยต่อของวัฏภาค ส่งผลให้ความเข้ากันได้ของเส้นใยฝ้ายกับเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชลดลง

ส่วนการดัดยัด (รูปที่ 4.2 (ค)) และ เปอร์เซ็นต์การดัดยัด ณ จุดขาด (รูปที่ 4.2 (ง)) ให้ผลในทำนองเดียวกันโดยมีแนวโน้มลดลง เมื่อมีการเพิ่มปริมาณเส้นใยฝ้าย เนื่องจากเส้นใยฝ้ายมีความสามารถในการยืดตัวต่ำและมีความเป็นผลึกสูง ทำให้เปลี่ยนรูปร่างได้ยากกว่าเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจึงทำให้เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีการเติมเส้นใยฝ้ายลงไปมีเปอร์เซ็นต์การดัดยัด ณ จุดขาด และการดัดยัดต่ำกว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ไม่มีการเติมเส้นใยฝ้าย

จากรูปที่ 4.2 (ด) พบว่าเมื่อทำการเติมเส้นใยฝ้ายลงในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ทำให้ความแข็งกดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากเส้นใยฝ้ายมีความแข็งมากกว่าเมทริกซ์ของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและความแข็งกดเป็นสมบัติทางพื้นผิว ดังนั้นการเพิ่มปริมาณของเส้นใยฝ้ายในเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช จึงทำให้ปริมาณของเส้นใยฝ้ายที่กระจายอยู่ตามพื้นผิวของชิ้นงานมีมากขึ้น ส่งผลให้พื้นผิวของชิ้นงานมีความแข็งเพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ผสมเส้นใยฝ้ายปริมาณ 0 3 5 7 และ 10 % โดยน้ำหนัก พบว่าความเข้ากันได้ของเส้นใยฝ้ายกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีแนวโน้มลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณเส้นใยฝ้าย และเส้นใยฝ้ายที่ 15% โดยน้ำหนัก พบว่าไม่สามารถทำการผสมเส้นใยฝ้ายให้เข้ากับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชได้ เนื่องจากมีเส้นใยในปริมาณมาก ส่งผล

ให้แบ่งข้าวเจ้าผสมกลีเซอรอลที่ทำหน้าที่เป็นเมทริกซ์นั้นไม่สามารถห่อหุ้มเส้นใยฝ้ายเพื่อให้เกิดเป็นวัสดุที่ต่อเนื่องกันได้ ทำให้มีเส้นใยบางส่วนแยกออกจากเมทริกซ์

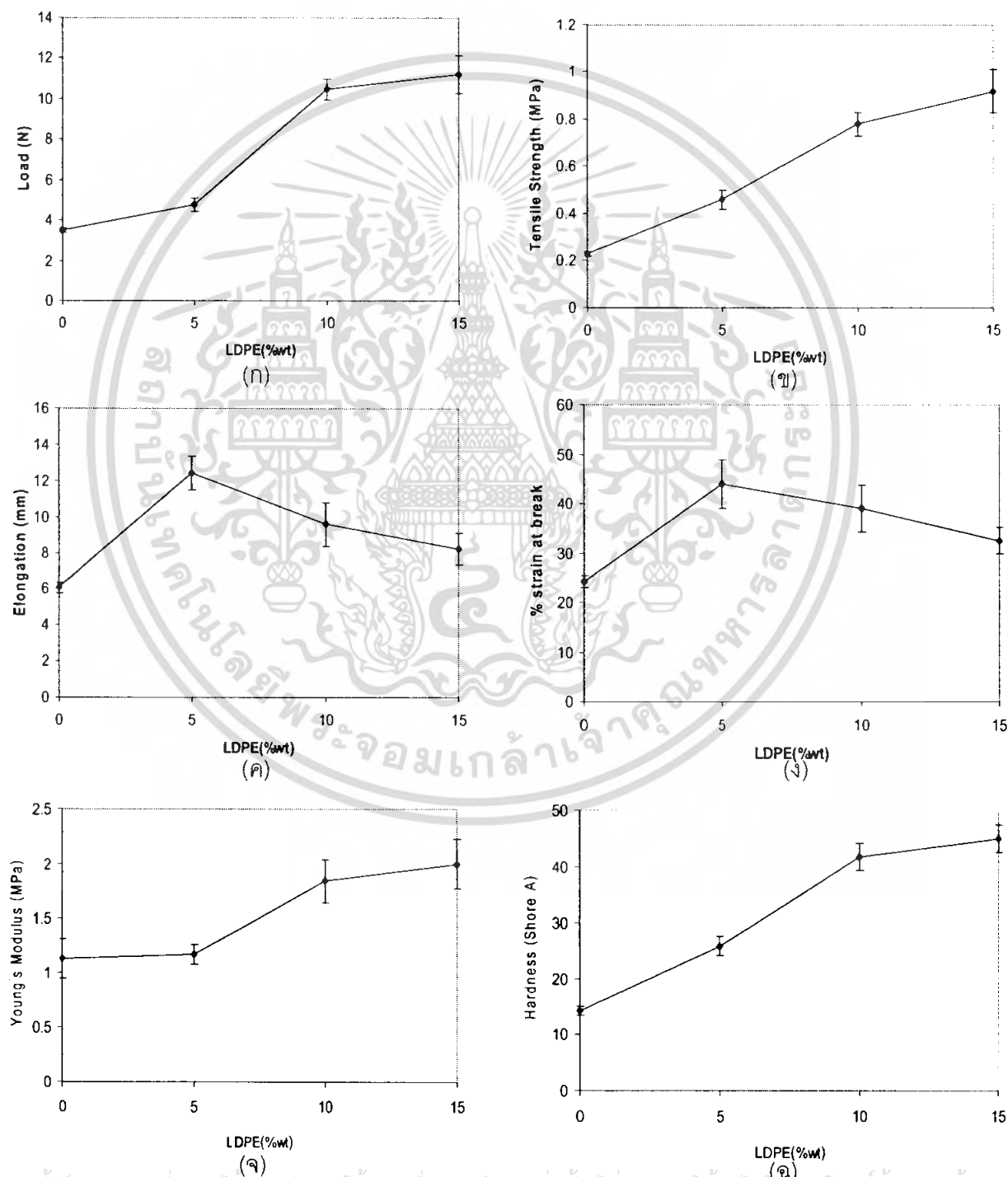
ดังนั้นหากพิจารณาจากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสังเคราะห์ที่ผสมเส้นใยฝ้ายในปริมาณต่างๆ กัน พบว่าเทอร์โมพลาสติกสังเคราะห์ที่มีเส้นใยฝ้ายผสมอยู่ 5% โดยน้ำหนัก มีค่าแรงดึง ความแข็งแรงดึง และมอดุลัสสูงที่สุด จึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปศึกษาเพื่อปรับปรุงสมบัติต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.1.3 การศึกษาการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งข้าวเจ้า โดยใช้ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

เนื่องจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ มีสมบัติ คือ มีความเหนียว (Toughness) ยืดหยุ่น (Flexibility) ดีแม้ใช้งานที่อุณหภูมิต่ำ และกระบวนการแปรรูป ทำได้ง่าย ดังนั้น จึงเลือกใช้ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำปรับปรุงสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรล จากการ ทดสอบสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ผสมด้วย พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำใน ปริมาณ 0, 5, 10 และ 15% ให้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.3 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่ทำการผสมด้วยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

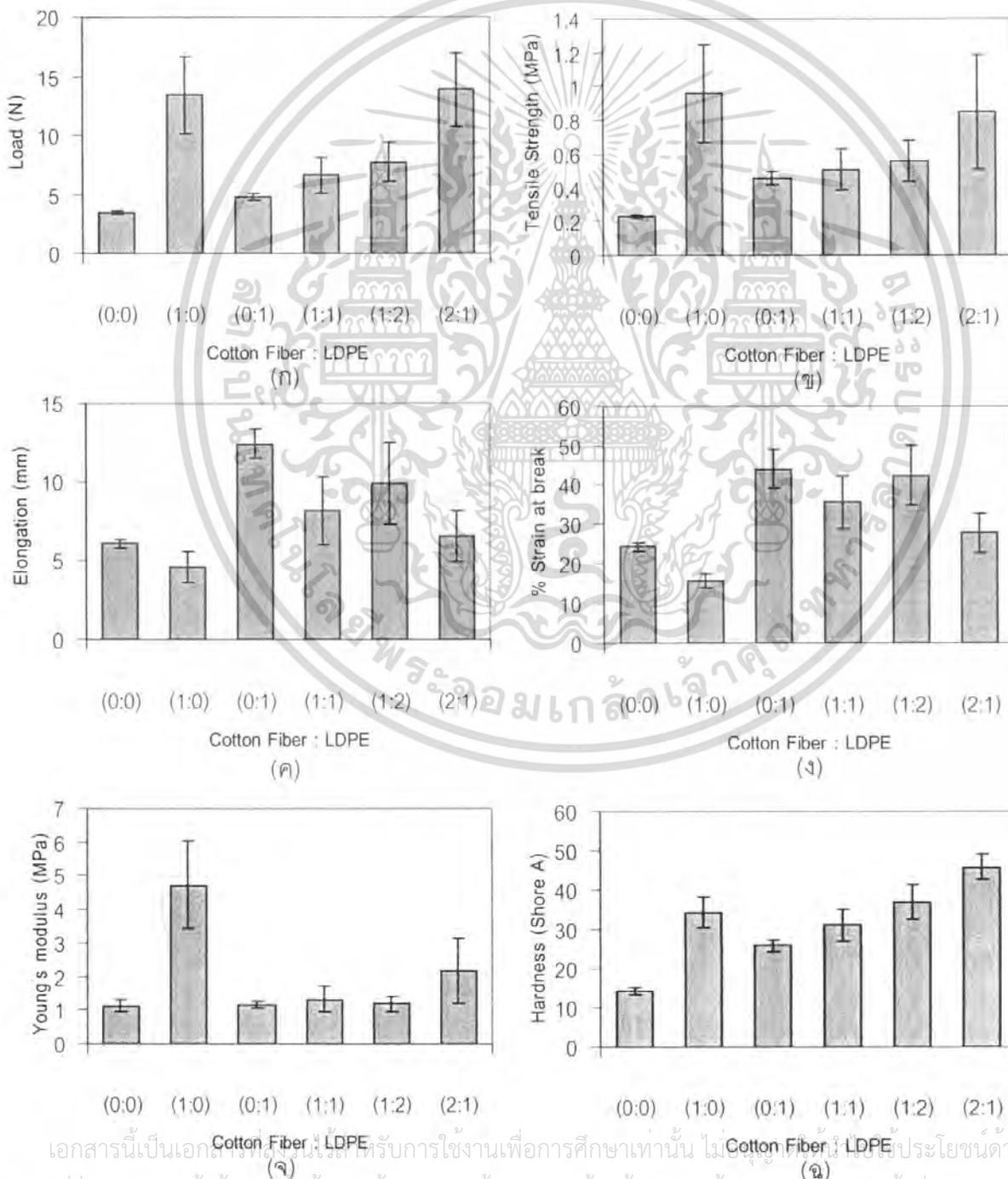
ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเชิงกลและปริมาณพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ แสดงดังรูปที่ 4.3 จากผลการทดลอง พบว่า แรงดึง (รูปที่ 4.3 (ก)) ความแข็งแรงดึง (รูปที่ 4.3 (ข)) โมดูลัส (รูปที่ 4.3 (จ)) และ ความแข็งกด (รูปที่ 4.3 (ฉ)) มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เพราะพอลิเอทิลีน มีความต้านทานแรงดึง เหนียว และยืดหยุ่นได้ดี เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ได้จากการปรับปรุงสมบัติด้วยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ จึงมีความแข็ง (Stiffness) เพิ่มขึ้น ความแข็งแรงดึง และโมดูลัสจึงเพิ่มขึ้น ส่วนการดึงยืด (รูปที่ 4.3 (ค)) และ เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (รูปที่ 4.3 (ง)) พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงจุดจุดหนึ่งจากนั้นจึงลดลง คือ เมื่อใส่พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในปริมาณ 5% โดยน้ำหนัก การดึงยืด และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดมีค่าเพิ่มขึ้น แต่เมื่อใส่ในปริมาณ 10 % และ 15 % โดยน้ำหนัก การดึงยืด และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาดนั้นมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย

จากการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้า ซึ่งปรับปรุงสมบัติโดยใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำแสดงการแยกกันระหว่างวัฏภาคทั้งสอง เนื่องจากเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชนั้นมีความเป็นขั้ว ส่วนพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำนั้นเป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว และพบว่าเมื่อปริมาณพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเพิ่มขึ้น เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ได้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เนื่องจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่กระจายอยู่ในเมทริกซ์ของแป้งโดยมีแนวโน้มเกาะกันเป็นกลุ่มก้อน การเสียดทานจากแรงดึงจึงทำได้ยากกว่า ส่วนกรณีใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในปริมาณน้อยกว่านั้น พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกระจายตัวในเมทริกซ์ของแป้งได้ดีกว่า ทำให้เกิดรอยต่อระหว่างวัฏภาคซึ่งเป็นจุดบกพร่องของชิ้นงานมากกว่า จึงให้สมบัติเชิงกลต่ำกว่ากรณีใส่ปริมาณพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมากกว่า

จากการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้า ซึ่งปรับปรุงสมบัติโดยใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ พบว่าปริมาณพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่เหมาะสมในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชนี้ คือ 5% โดยน้ำหนัก เนื่องจากให้สมบัติเชิงกลที่ยอมรับได้ นอกจากนี้การผสมในเครื่องผสมระบบปิดทำได้ง่ายกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในปริมาณ 10% และ 15 % โดยน้ำหนัก

4.1.4 การศึกษาการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์จากแป้งข้าวเจ้าโดยใช้เส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

การทดลองในส่วนนี้เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์โดยใช้เส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนร่วมกัน จากการทดลองตอนที่ 4.1.2 และ 4.1.3 พบว่าปริมาณเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่เหมาะสม คือ 5% โดยน้ำหนัก ดังนั้นการทดลองส่วนนี้จึงเกี่ยวข้องกับการศึกษาอัตราส่วนระหว่างเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ดังนี้ 0:0 1:0 0:1 1:1 1:2 และ 2:1 ซึ่งเลือกเติมเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำลงไป 5% โดยน้ำหนัก

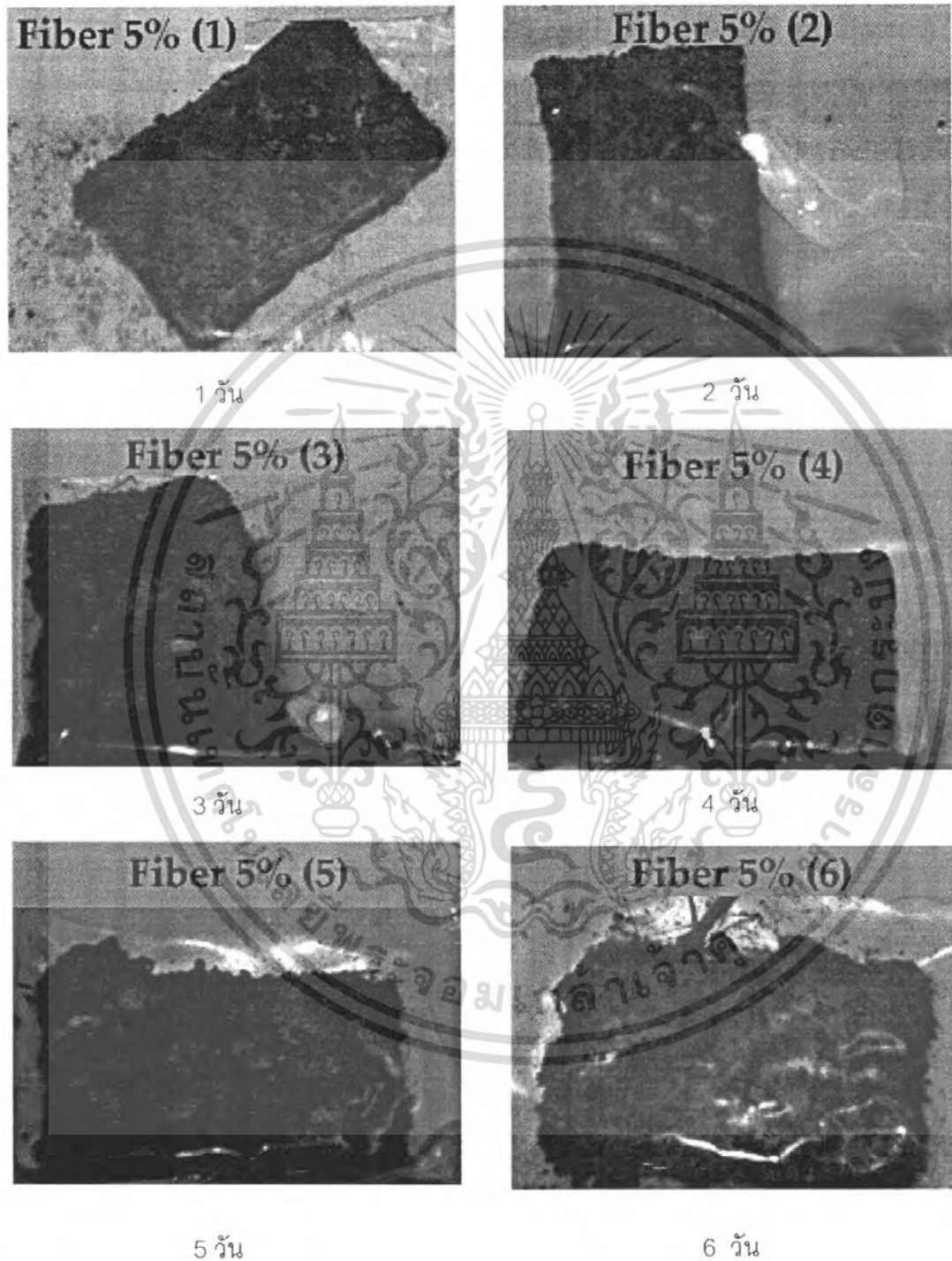


รูปที่ 4.4 สมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์ที่ทำการผสมด้วย เส้นใยฝ้าย : พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงดึง ความแข็งแรงดึง การดึงยืดเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด มอดุลัส และความแข็งกดของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชเมื่อนำเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำผสมกับเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช เมื่อพิจารณาสูตรอัตราส่วนเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ 1:0 พบว่าค่าแรงดึง ความแข็งแรงดึง มอดุลัส และความแข็งกด (รูปที่ 4.4 (ก) (ข) (จ) และ (ฉ)) มีค่าที่เพิ่มมากขึ้นจากสูตรอัตราส่วนเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ 0:0 เนื่องมาจากเส้นใยเป็นวัสดุเสริมแรงตามธรรมชาติที่สามารถช่วยเสริมแรง และช่วยให้เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชสามารถยึดเกาะกันได้ดีมากขึ้น จึงทำให้เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ได้มีความแข็งแรงและสามารถรับแรงกดได้มากขึ้น และเมื่อพิจารณาสูตรอัตราส่วนเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ 0:1 พบว่าทำให้ค่าการดึงยืด และเปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด (รูปที่ 4.4 (ค) และ (ง)) เพิ่มมากขึ้นจากสูตรอัตราส่วนเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ 0:0 เช่นกัน ทั้งนี้เพราะพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ทำหน้าที่เสมือนช่วยรับแรงดึงที่กระทำต่อเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ทำให้สามารถดึงยืดได้มากขึ้น เสมือนมีความยืดหยุ่นที่ตุนขึ้นนั่นเอง

นอกจากนี้เมื่อเติมเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นต่ำในอัตราส่วนเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีน 1:2 ทำให้เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช สามารถรับการดึงยืดได้ดีกว่าสูตรอัตราส่วนเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีน 1:1 และ 2:1 เนื่องจากมีปริมาณพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมากกว่าเส้นใยฝ้าย (รูปที่ 4.4 (ค) และ (ง)) แต่ในทางกลับกันเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชสูตรอัตราส่วนเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีน 2:1 มีความแข็งแรงสูงกว่าสูตรอัตราส่วนเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีน 1:1 และ 1:2 เนื่องจากมีปริมาณเส้นใยมากกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมากกว่านั่นเอง (รูปที่ 4.4 (ก) (ข) (จ) และ (ฉ)) สำหรับสูตรอัตราส่วน 1:1 นั้น มีสมบัติเชิงกลโดยรวมต่ำกว่าสูตรอัตราส่วน 1:2 และ 2:1 เพราะปริมาณเส้นใยฝ้ายเท่ากับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ จึงไม่แสดงสมบัติเชิงกลโดยรวมอันเป็นผลมาจากเส้นใยฝ้ายหรือพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำอย่างเด่นชัด

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชสูตร 2:1 ถือเป็นสูตรที่มีสมบัติเชิงกลโดยรวมดีที่สุดในงานวิจัยนี้ โดยพิจารณาจากค่าแรงดึง ความแข็งแรงดึง มอดุลัส และความแข็งกดที่มากที่สุด

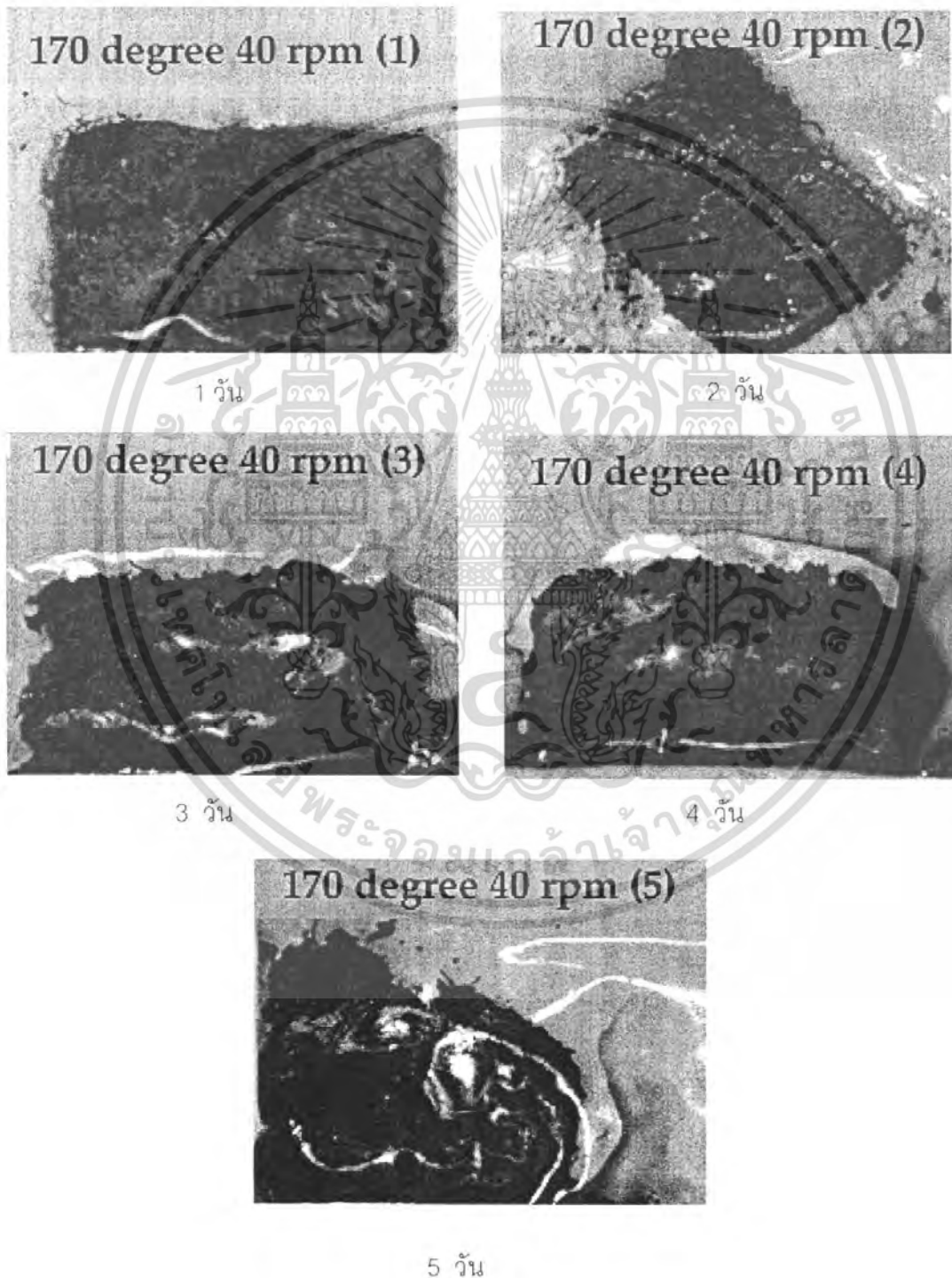


รูปที่ 4.6 การย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกผสมด้วยเส้นใยฝ้าย 5% โดยน้ำหนัก

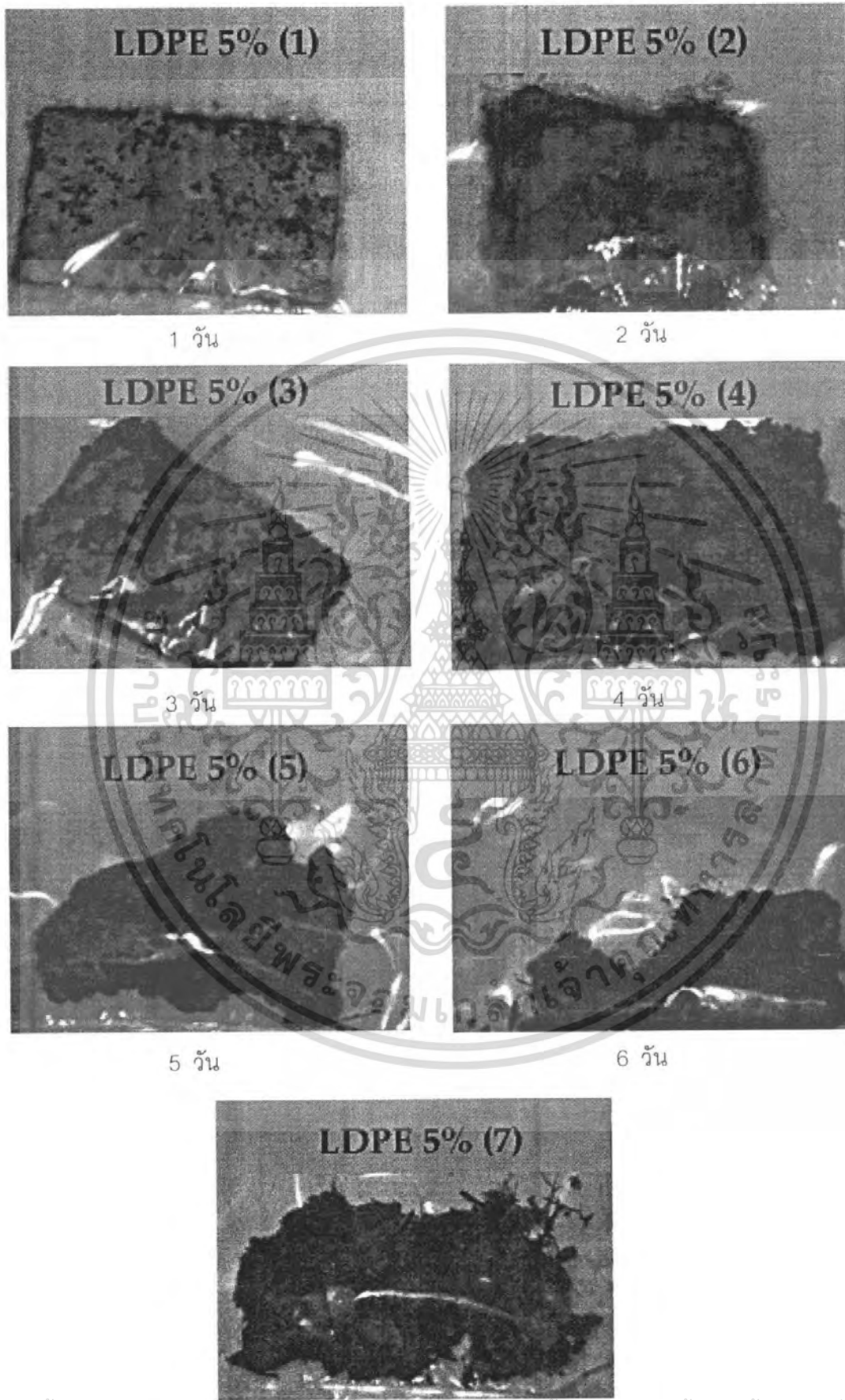
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การย่อยสลายโดยการฝังดิน

การทดสอบการย่อยสลายโดยการฝังดินได้นำเทอร์โมพลาสติกสไตร์ที่มีอัตราส่วนผสมของเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในอัตราส่วนต่าง ๆ ดังนี้ 0:0, 1:0, 0:1, 1:1, 1:2 และ 2:1 มาทำการทดสอบโดยฝังดินที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 และควบคุมความชื้นของดินคงที่ เป็นเวลา 7 วัน ซึ่งให้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.5

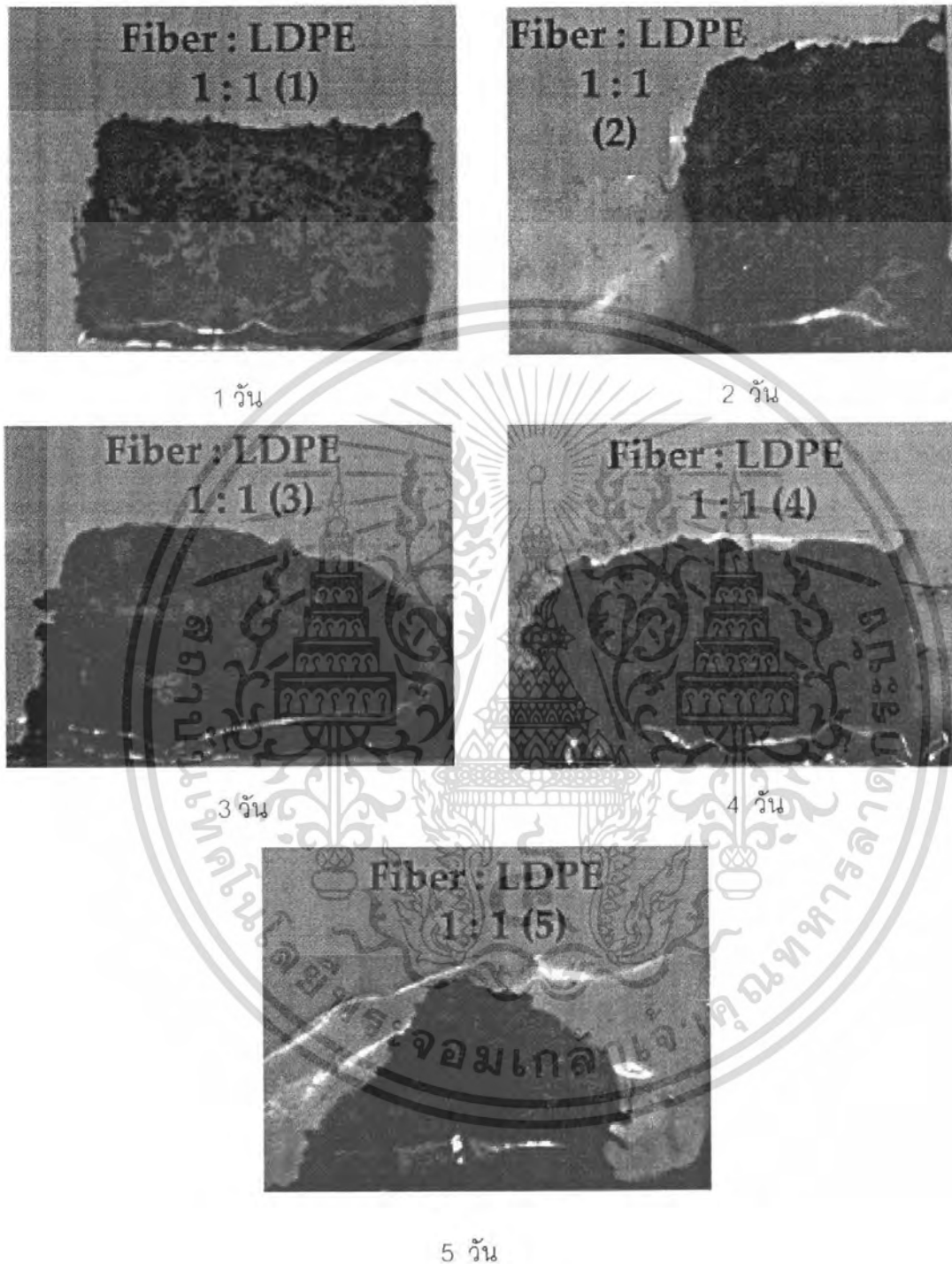


รูปที่ 4.5 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
การย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ผสมที่อุณหภูมิ 170 °C และความเร็วรอบ 40 รอบ/นาที  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



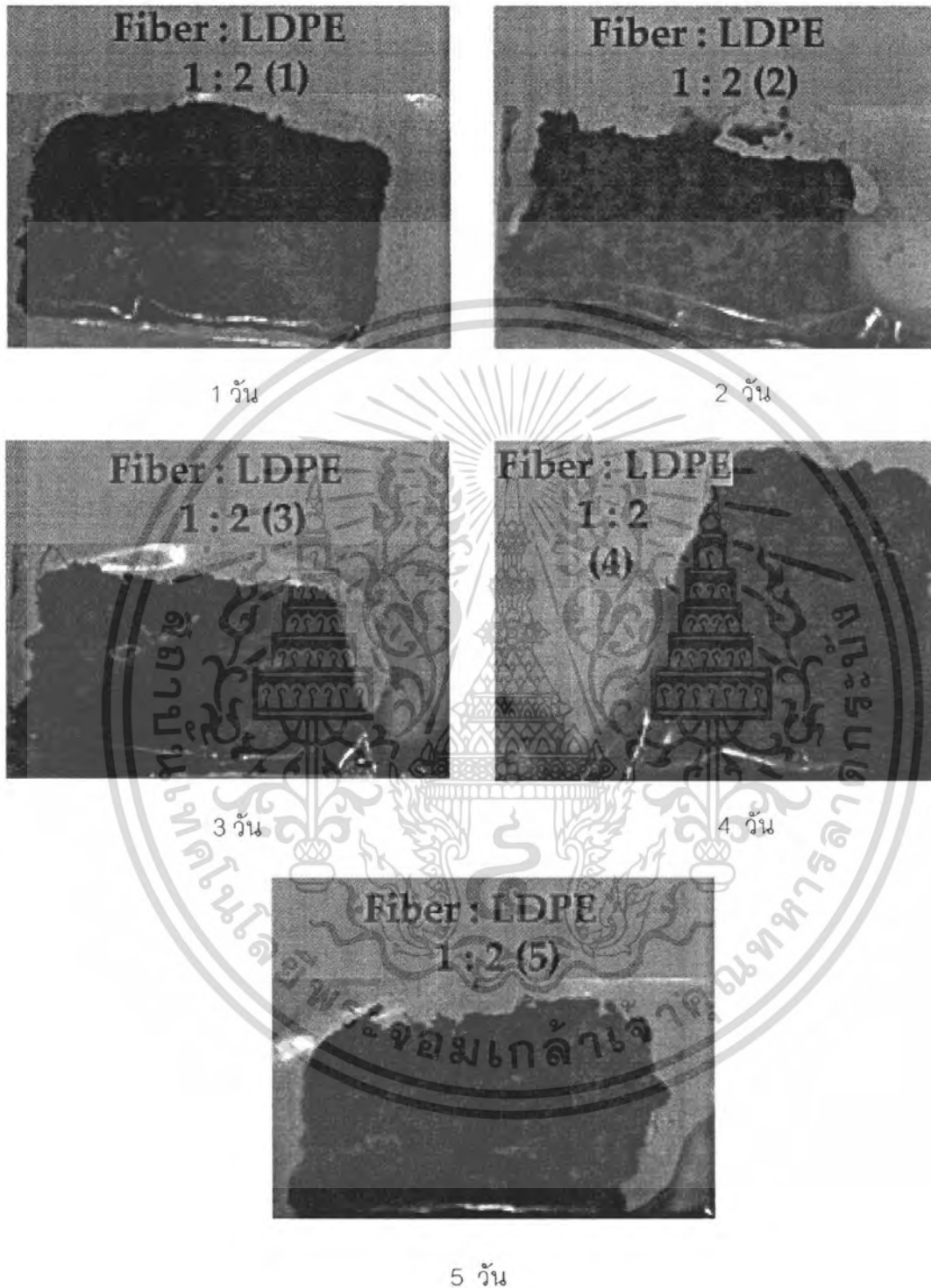
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.7 การย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกกลดาร์ผสมด้วยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ 5% โดยน้ำหนัก



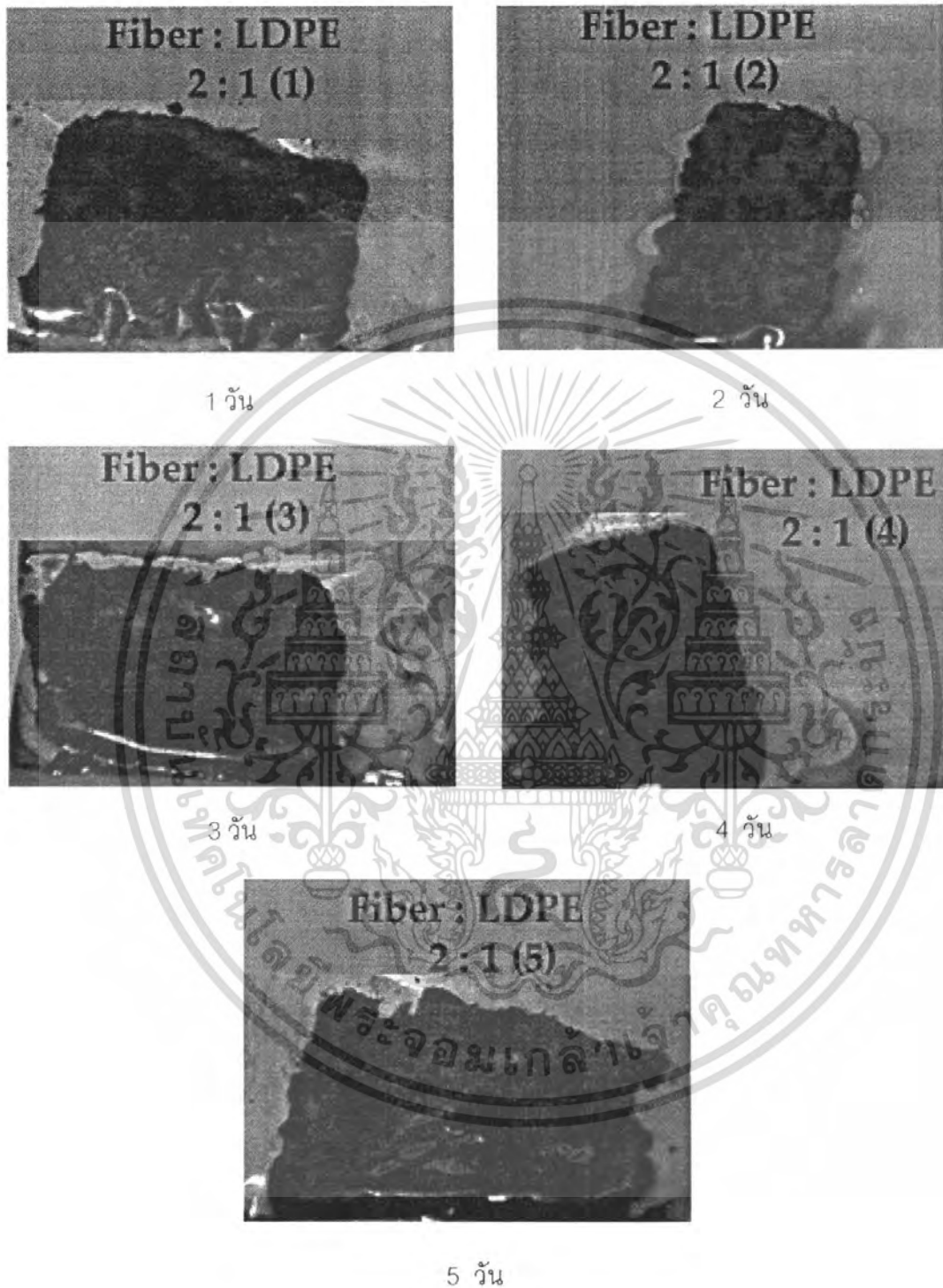
รูปที่ 4.8 การย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ผสมด้วยเส้นใยฝ้ายและ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในอัตราส่วนเท่ากับ 1:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 การย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ผสมด้วยเส้นใยฝ้ายและ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในอัตราส่วน เท่ากับ 1:2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 การย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ผสมด้วยเส้นใยฝ้ายและ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในอัตราส่วน เท่ากับ 2:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลการย่อยสลายของเทอร์โมพลาสติกสไตร์เมื่อผสมด้วยเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นต่ำร่วมกัน

เส้นใยฝ้าย : พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ	การย่อยสลาย
0:0	เมื่อเวลาผ่านไป 1 วัน เริ่มเกิดการย่อยสลายและการย่อยสลายเกิดขึ้นต่อไปจนชิ้นงานไม่สามารถรวมเป็นชิ้นงานอันเดียวกันได้ในเวลา 5 วัน
1:0	เมื่อเวลาผ่านไป 6 วัน ชิ้นงานไม่สามารถรวมเป็นเนื้อเดียวกันได้โดยส่วนที่เป็นเมทริกซ์ของแป้งจะย่อยสลายไปก่อน แต่ส่วนที่เป็นเส้นใยฝ้ายยังเหลืออยู่
0:1	เมื่อเวลาผ่านไป 7 วัน ชิ้นงานยังสามารถหยิบจับได้ โดยที่ชิ้นงานยังรวมเป็นชิ้นเดียวกันอยู่ และส่วนที่เป็นเมทริกซ์ของแป้งเกิดการย่อยสลายไปบ้าง
1:1	เมื่อเวลาผ่านไป 5 วัน ชิ้นงานย่อยสลายจนไม่สามารถรวมเป็นชิ้นเดียวกันได้ โดยส่วนที่เป็นเมทริกซ์ของแป้งย่อยสลายก่อน แต่ส่วนที่เป็นเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำยังเหลืออยู่
1:2	เมื่อเวลาผ่านไป 5 วัน ชิ้นงานย่อยสลายจนไม่สามารถรวมเป็นชิ้นเดียวกันได้ โดยส่วนที่เป็นเมทริกซ์ของแป้งย่อยสลายก่อน แต่ส่วนที่เป็นเส้นใยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำยังเหลืออยู่ และพบเส้นใยฝ้ายเหลืออยู่มากกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ
2:1	เมื่อเวลาผ่านไป 5 วัน ชิ้นงานย่อยสลายจนไม่สามารถรวมเป็นชิ้นเดียวกันได้ โดยส่วนที่เป็นเมทริกซ์ของแป้งย่อยสลายก่อน แต่ส่วนที่เป็นเส้นใยและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำยังเหลืออยู่ และพบพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเหลืออยู่มากกว่าเส้นใยฝ้าย

จากการทดสอบการย่อยสลายด้วยการฝังดิน พบว่าเทอร์โมพลาสติกสไตร์ทุกสูตรมีแนวโน้มการย่อยสลายที่เหมือนกัน โดยสูตร 0:1 ใช้ระยะเวลาในการย่อยสลายนานที่สุด เพราะมีการเติมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำลงไป 5% โดยน้ำหนัก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 การดูดซับน้ำ

การศึกษาการดูดซับน้ำของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่มีอัตราส่วนระหว่างเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ต่าง ๆ กันดังนี้ 0:0 1:0 0:1 1:1 1:2 และ 2:1 ภายใต้ความชื้นสัมพัทธ์ 50%

ตารางที่ 4.2 น้ำหนักของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงเมื่อทำการทดสอบการดูดซับน้ำเป็นเวลา 5 วัน

เส้นใยฝ้าย : พอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นต่ำ	น้ำหนักเฉลี่ย ก่อนทดสอบ (กรัม)	น้ำหนักเฉลี่ย หลังทดสอบ (กรัม)	น้ำหนักที่ เปลี่ยนแปลง (กรัม)	%การดูดซับน้ำ
0:0	1.06	1.10	0.42	2.93±0.73
1:0	0.92	0.94	0.02	3.95±0.58
0:1	0.96	0.98	0.03	2.18 ±0.09
1:1	1.03	1.06	0.03	2.90±0.95
1:2	1.02	1.05	0.03	2.53±0.78
2:1	1.13	1.17	0.04	2.54±0.18

ตารางที่ 4.1 แสดงน้ำหนักของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงเมื่อทำการทดสอบการดูดซับน้ำเป็นเวลา 5 วัน พบว่าสูตรอัตราส่วนเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีน 1:0 มีความสามารถในการดูดซับน้ำดีกว่าสูตรอัตราส่วนเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีน 0:0 เพราะการเติมเส้นใยฝ้ายลงไปช่วยให้เทอร์โมพลาสติกสามารถดูดซับน้ำได้มากขึ้น เนื่องจากเส้นใยฝ้ายมีส่วนที่มีขั้วอยู่ในโครงสร้าง แต่สูตรอัตราส่วนเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีน 0:1 มีความสามารถในการดูดซับน้ำต่ำกว่าสูตรอัตราส่วนเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีน 0:0 เพราะมีส่วนประกอบของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำอยู่ ซึ่งโครงสร้างของพอลิเอทิลีนไม่มีขั้วจึงมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้ต่ำกว่าสูตรอัตราส่วนเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีน 1:0 และสูตรอัตราส่วนเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีน 0:0

เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างสูตรอัตราส่วนเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีน 0:0 และสูตรอัตราส่วนเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนในอัตราส่วน 1:1 1:2 และ 2:1 พบว่าเมื่อผสมเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนในอัตราส่วนต่าง ๆ ทำให้เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีความสามารถในการดูดซับน้ำต่ำกว่าสูตรอัตราส่วนเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีน 0:0 แม้ว่าสูตรอัตราส่วนเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีน 1:1 1:2 และ 2:1 มีการผสมเส้นใยฝ้ายลงไป ซึ่งเป็นส่วนที่มีขั้วที่ช่วยให้สามารถดูดซับน้ำได้ดีขึ้นกว่าสูตรอัตราส่วนเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีน 0:0 แต่การเติมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำลงไปในนั้นทำให้

เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีความสามารถในการดูดซับน้ำได้ลดลง เพราะสูตรโครงสร้างของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเป็นส่วนที่ไม่มีขั้ว จึงทำให้มีความสามารถในการดูดซับน้ำต่ำกว่า  
 สูตรอัตราส่วนเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีน 0:0

สรุปได้ว่าในงานวิจัยนี้ พบว่าสูตรอัตราส่วนเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีน 1:0 มีความสามารถในการ  
 การดูดซับน้ำที่มากที่สุด และสูตรอัตราส่วนเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีน 0:1 มีความสามารถในการ  
 ดูดซับน้ำต่ำที่สุด นอกจากนี้การเติมเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำทำให้ได้ผล  
 การดูดซับน้ำมีแนวโน้มลดลง เพราะมีความสามารถในการดูดซับน้ำที่ไม่สูงหรือต่ำจนเกินไป  
 อันส่งผลต่ออายุการใช้งานของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช หากมีความสามารถดูดซับน้ำที่สูงจะทำให้  
 เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชมีอายุการใช้งานสั้น เพราะฉะนั้นจะเห็นว่า การเติมเส้นใยฝ้ายและ  
 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำจะช่วยปรับปรุงการดูดซับน้ำของเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

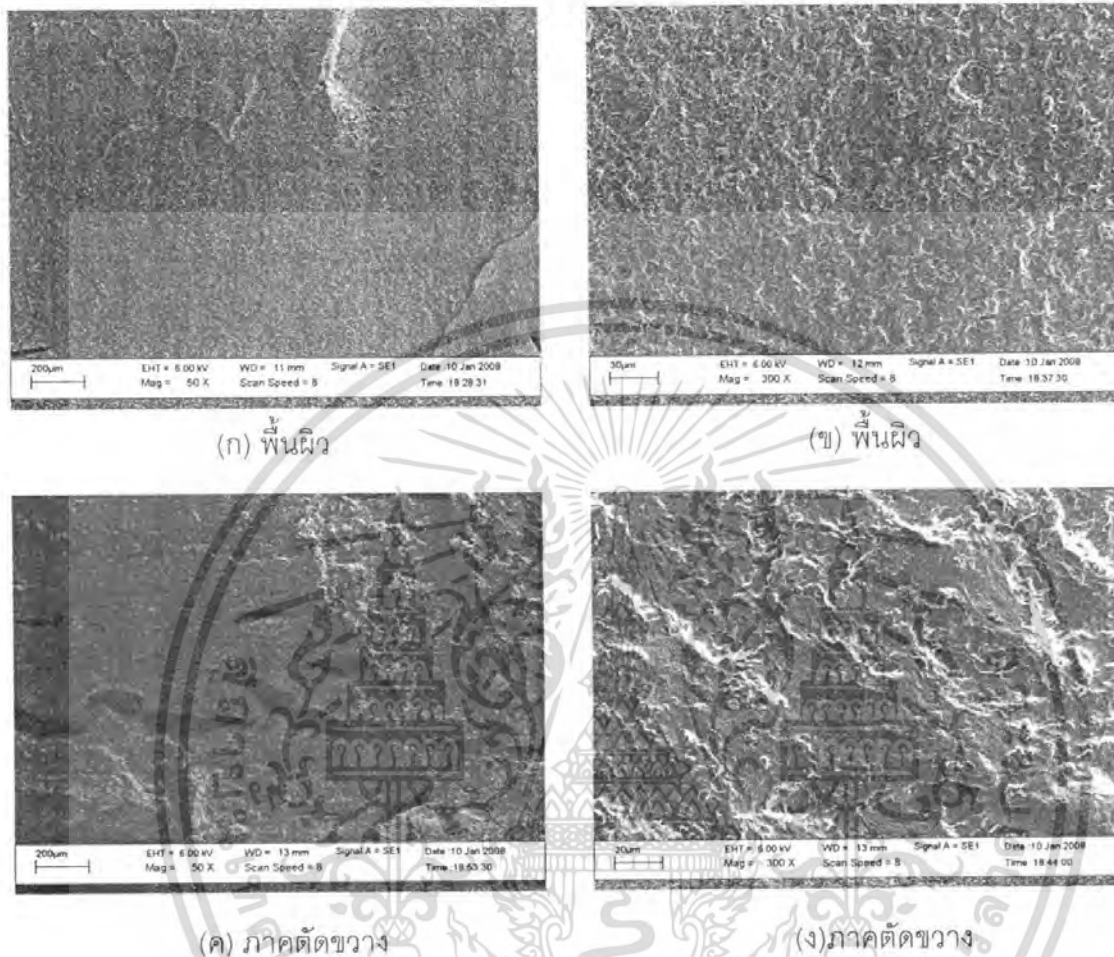
#### 4.4 สัณฐานวิทยา (Morphology)

การศึกษาสัณฐานวิทยา (Morphology) ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวเจ้า โดยปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ทำได้โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) เพื่อศึกษาลักษณะการกระจายตัว (Dispersion) และลักษณะพื้นผิวระหว่างวัฏภาค (Interfacial surface) ของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่ปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยฝ้าย หรือพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำร่วมกัน ให้ผลการทดลองดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.1 เทอร์โมพลาสติกสไตรซ์จากแป้งข้าวเจ้า ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 40 รอบ/นาที

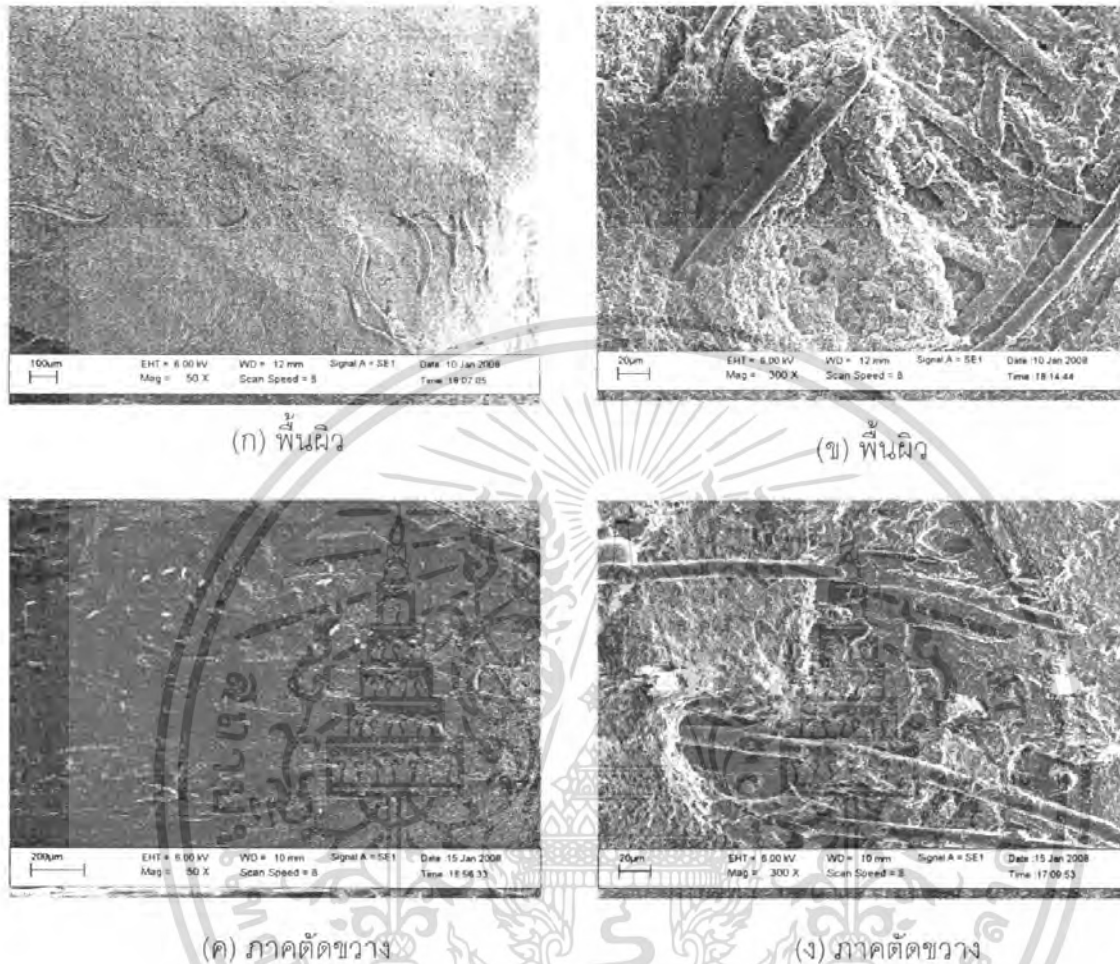


รูปที่ 4.11 เทอร์โมพลาสติกสไตรซ์จากแป้งข้าวเจ้า ที่อุณหภูมิ 170 °C ความเร็วรอบ 40 rpm เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 50 เท่า [(ก) และ (ค)] และ 300 เท่า [(ข) และ (ง)]

จากรูปที่ 4.11 (ก) และ (ข) แสดงให้เห็นลักษณะของพื้นผิวของเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์จากแป้งข้าวเจ้า ที่กำลังขยาย 50 และ 300 เท่าตามลำดับ พบว่าพื้นผิวมีลักษณะขรุขระ ส่วนรูปที่ 4.11 (ค) และ (ง) แสดงให้เห็นลักษณะภายในภาคตัดขวางของชิ้นงานเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์จากแป้งข้าวเจ้า ซึ่งมีช่องว่างหรือรูพรุนกระจายอยู่บ้าง เนื่องมาจากความชื้นที่แป้งดูดซับไว้ ดังนั้นเมื่อนำมาผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิดที่อุณหภูมิสูงจึงเกิดการระเหยของน้ำและความชื้นเกิดเป็นช่องว่างภายในชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.2 เทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวเจ้า โดยใช้เส้นใยฝ้ายเป็นส่วนเสริมแรง

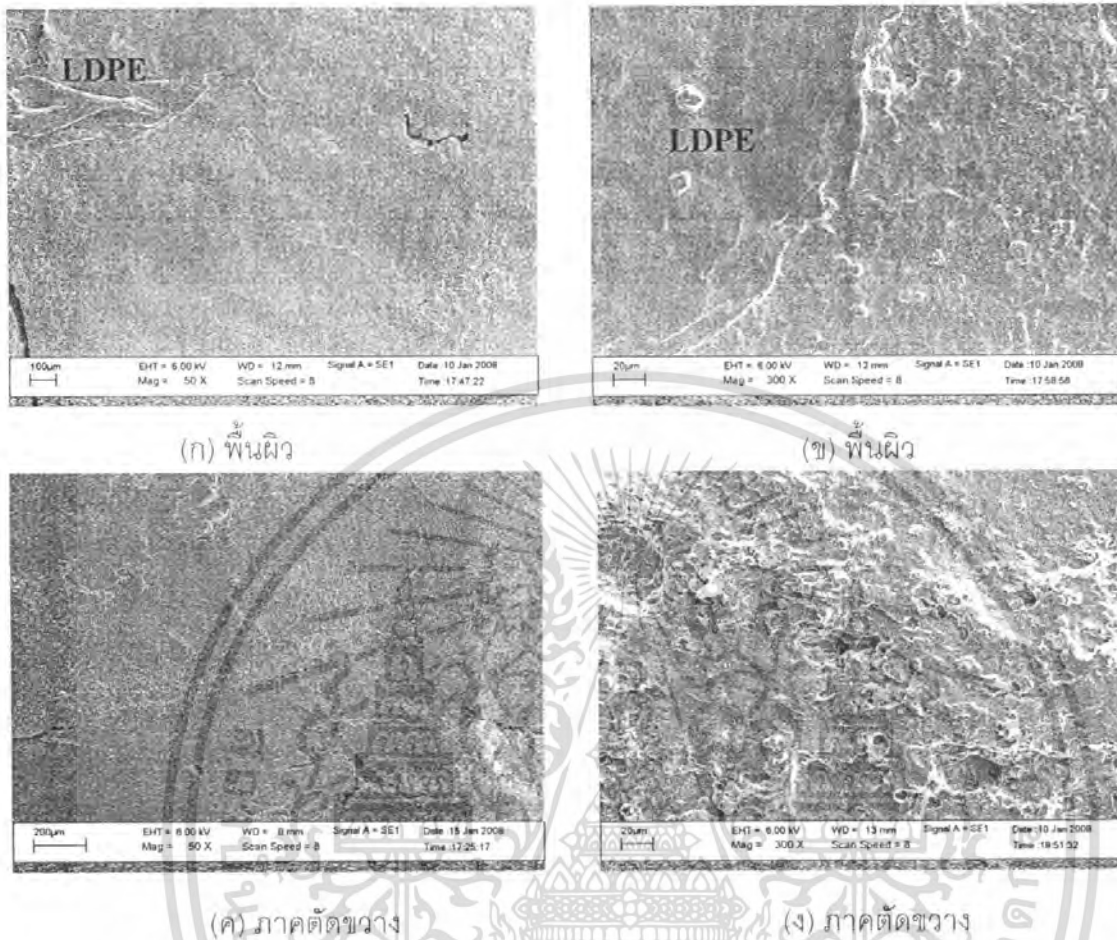


รูปที่ 4.12 เทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวเจ้าเสริมแรงด้วยเส้นใยฝ้าย 5 % เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 50 เท่า [(ก) และ (ค)] และ 300 เท่า [(ข) และ (ง)]

จากรูปที่ 4.12 (ก) และ (ข) แสดงลักษณะบริเวณพื้นผิวของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวเจ้าที่ผสมเส้นใยฝ้าย 5% ที่กำลังขยาย 50 และ 300 เท่าตามลำดับ ศึกษาการกระจายตัวของเส้นใยฝ้ายในเมทริกซ์ พบว่าเส้นใยฝ้ายมีการกระจายตัวที่ดี และรูปที่ 4.12 (ค) และ (ง) แสดงถึงความสามารถในการผสมของเส้นใยฝ้ายกับเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวเจ้า พบว่าเส้นใยสามารถเข้ากันได้ดีกับเมทริกซ์ สังเกตได้จากการที่มีอนุภาคแป้งไปเกาะอยู่บนผิวของเส้นใย เนื่องจากมีหมู่ไฮดรอกซิลเช่นเดียวกัน แต่มีเส้นใยบางส่วนไม่ถูกปกคลุมด้วยเมทริกซ์ เนื่องจากมีเส้นใยอยู่ในปริมาณมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

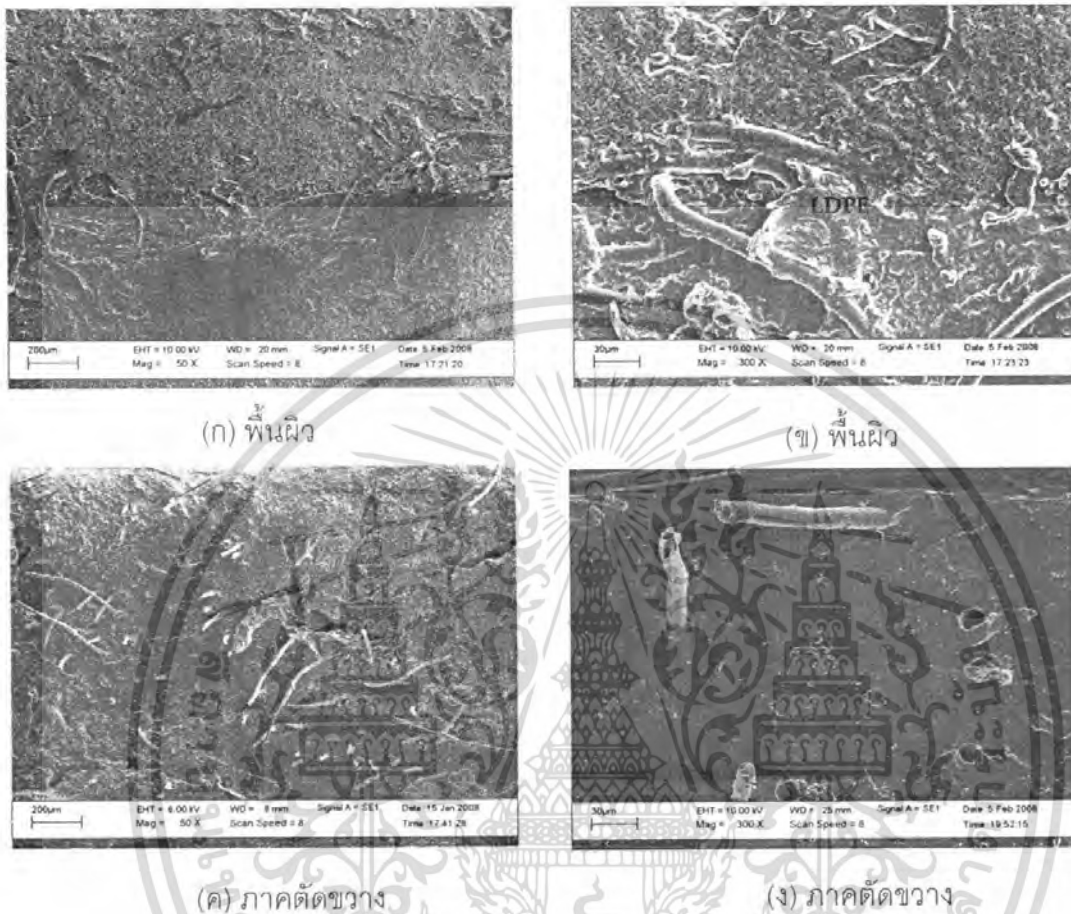
#### 4.4.3 เทอร์โมพลาสติกสติกสารชปรับปรุงสมบัติโดยใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ



รูปที่ 4.13 เทอร์โมพลาสติกสติกสารช จากแป้งข้าวเจ้าผสมด้วย LDPE 5 % เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 50 เท่า [(ก) และ (ค)] และ 300 เท่า [(ข) และ (ง)]

จากรูปที่ 4.13 (ก) และ (ข) แสดงลักษณะบริเวณพื้นผิวของเทอร์โมพลาสติกสติกสารชจากแป้งข้าวเจ้าที่ผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ 5% ที่กำลังขยาย 50 และ 300 เท่าตามลำดับศึกษาการกระจายตัว และความเข้ากันได้ของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกับเมทริกซ์ พบว่ามีการกระจายตัวต่ำเนื่องจากความมีขั้วที่ต่างกัน โดยพอลิเอทิลีนซึ่งเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้วจึงชอบอยู่ด้วยกันเองมากกว่ากระจายในเมทริกซ์ของแป้งข้าวเจ้าซึ่งมีขั้ว ทำให้เกิดการแยกวัฏภาคระหว่างสารทั้งสองชนิดอย่างชัดเจน โดยพอลิเอทิลีน คือ ส่วนที่มีลักษณะพื้นผิวที่เรียบ ส่วนเมทริกซ์ซึ่งเป็นเทอร์โมพลาสติกสติกสารชจากแป้งข้าวเจ้าคือส่วนที่มีพื้นผิวขรุขระเนื่องจากอนุภาคของแป้ง ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ส่วนรูปที่ 4.13 (ค) และ (ง) แสดงลักษณะบริเวณภาคตัดขวาง พบว่ามีการกระจายตัวที่ดีของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในเมทริกซ์ เมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณพื้นผิว นอกจากนี้ยังพบช่องว่างกระจายอยู่ด้วย ซึ่งมีสาเหตุจากความชื้นที่ระเหยออกไปขณะทำการผสมนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.4 เทอร์โมพลาสติกสไตร์ชจากแป้งข้าวเจ้าปรับปรุงสมบัติโดยใช้เส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำร่วมกัน เท่ากับ 1:1

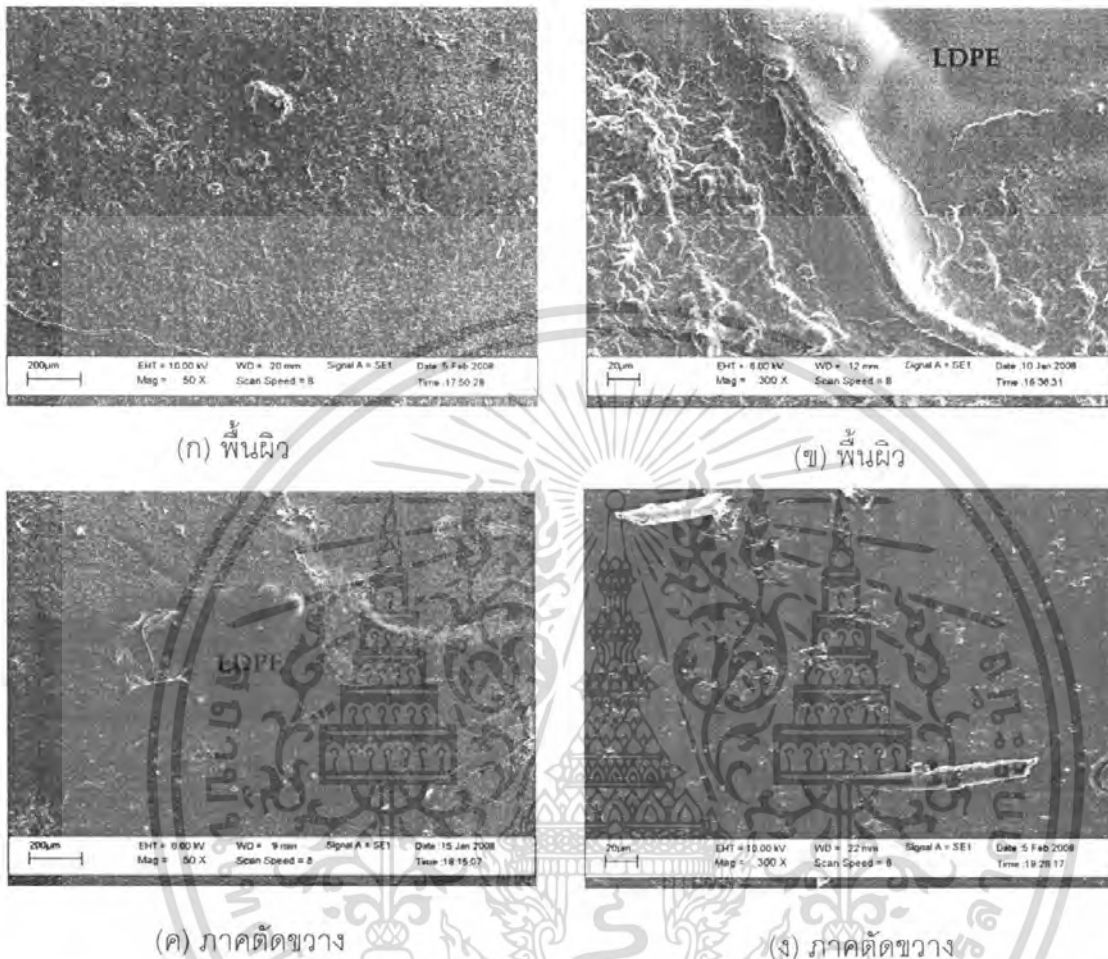


รูปที่ 4.14 เทอร์โมพลาสติกสไตร์ชจากแป้งข้าวเจ้า ผสมด้วยเส้นใยฝ้าย : LDPE อัตราส่วน 1 : 1 เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 50 เท่า [(ก) และ (ค)] และ 300 เท่า [(ข) และ (ง)]

จากรูปที่ 4.14 (ก) และ (ค) พบว่าเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกระจายตัวในเมทริกซ์ที่เป็นแป้งทั่วทั้งชิ้นงาน โดยเส้นใยฝ้ายมีแนวโน้มการรวมตัวกันนั้นเป็นกลุ่มก้อน ในรูปที่ 4.14 (ข) และ (ง) พบว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและเทอร์โมพลาสติกเกิดการแยกกันระหว่างระหว่างวัฏภาค เนื่องจากเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชนั้นมีขั้ว แต่พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำนั้นเป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว ทำให้วัฏภาคทั้งสองมีความไม่เข้ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.5 เทอร์โมพลาสติกสติกส์จากแป้งข้าวเจ้าปรับปรุงสมบัติโดยใช้เส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำร่วมกัน เท่ากับ 1:2

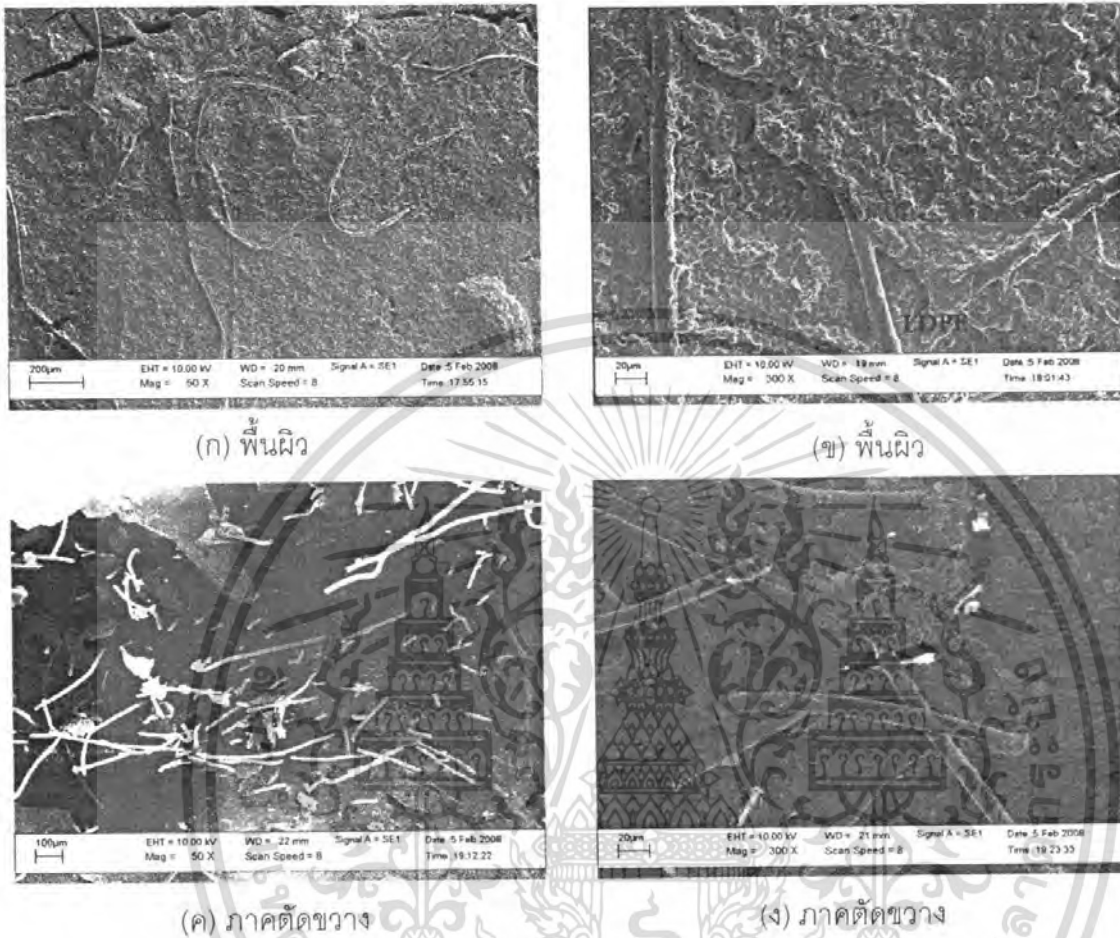


รูปที่ 4.15 เทอร์โมพลาสติกสติกส์จากแป้งข้าวเจ้าผสมด้วยเส้นใยฝ้าย : LDPE อัตราส่วน 1:2 เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 50 เท่า [(ก) และ (ค)] และ 300 เท่า [(ข) และ (ง)]

จากรูปที่ 4.15 (ก) และ (ค) พบว่า เส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกระจายตัวในเมทริกที่เป็นแป้ง โดยพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีปริมาณมากกว่า และรูปที่ 4.15 (ข) และ (ง) พบว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและเทอร์โมพลาสติกสติกส์เกิดการแยกแหว่งวิฎภาคซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจน เนื่องจากเทอร์โมพลาสติกสติกส์นั้นมีขั้ว แต่พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำนั้นเป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว ซึ่งบริเวณที่เห็นเป็นผิวเรียบนั้นเป็นพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ และบริเวณขรุขระเป็นส่วนของแป้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.6 เทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวเจ้าปรับปรุงสมบัติโดยใช้เส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำร่วมกัน เท่ากับ 2:1



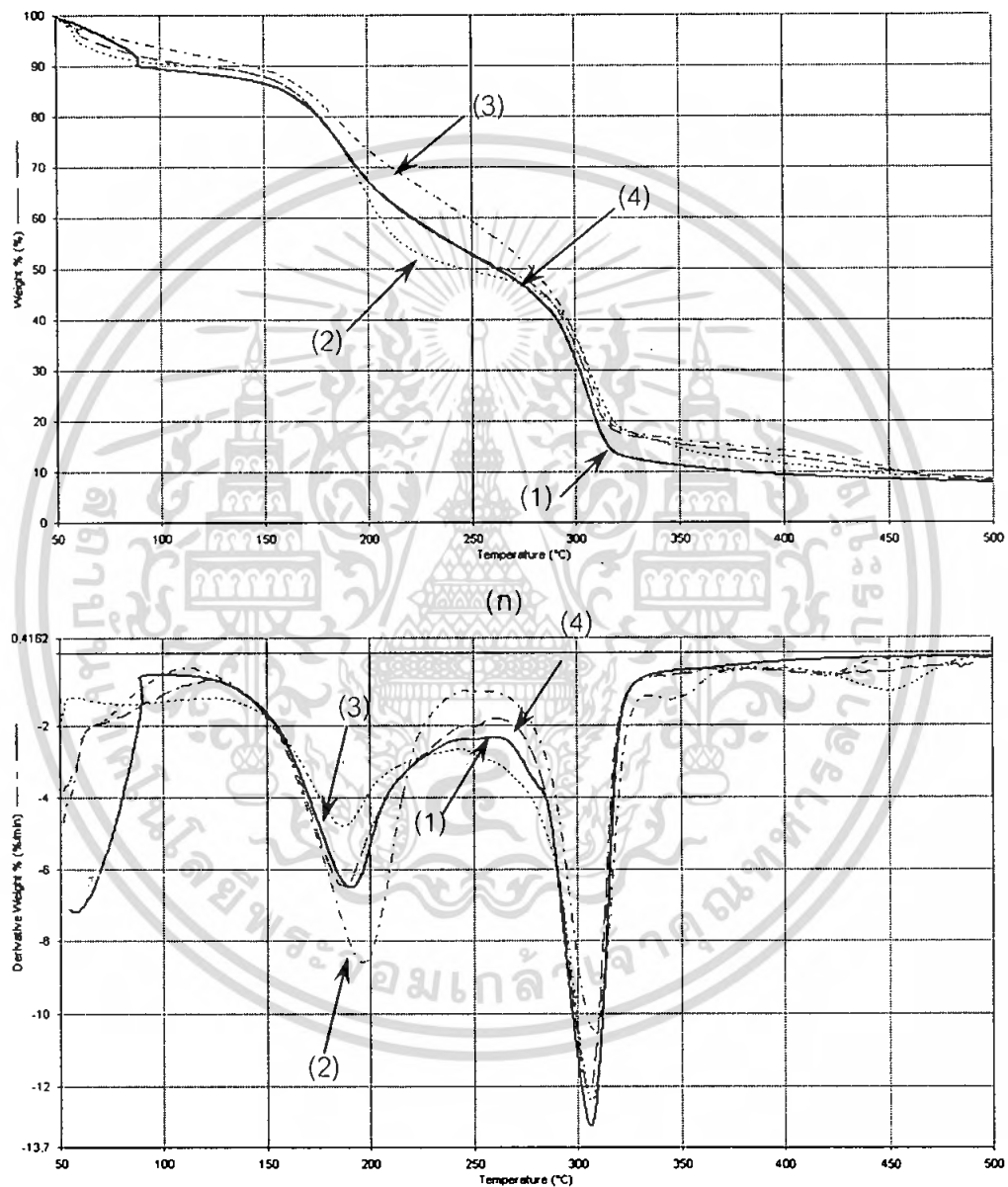
รูปที่ 4.16 เทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวเจ้า ผสมด้วยเส้นใยฝ้าย LDPE อัตราส่วน 2:1 เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 50 เท่า [(ก) และ (ค)] และ 300 เท่า [(ข) และ (ง)]

จากรูปที่ 4.16 (ก) และ (ค) พบว่า เส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำกระจายตัวในเมทริกซ์ที่เป็นแป้ง โดยเส้นใยฝ้ายมีปริมาณมากกว่า จึงเห็นเส้นใยกระจายอยู่เป็นจำนวนมาก และรูปที่ 4.16 (ข) และ (ง) พบว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำและเทอร์โมพลาสติกสตาโรซเกิดการแยกแหว่งวัฏภาค เนื่องจากเทอร์โมพลาสติกสตาโรซนั้นมีขั้ว แต่พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำนั้นเป็นโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว ส่วนเส้นใยฝ้ายและแป้งมีความมีขั้วเหมือนกันจึงเข้ากันได้ โดยแป้งห่อหุ้มเส้นใยไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 สมบัติด้านความร้อน

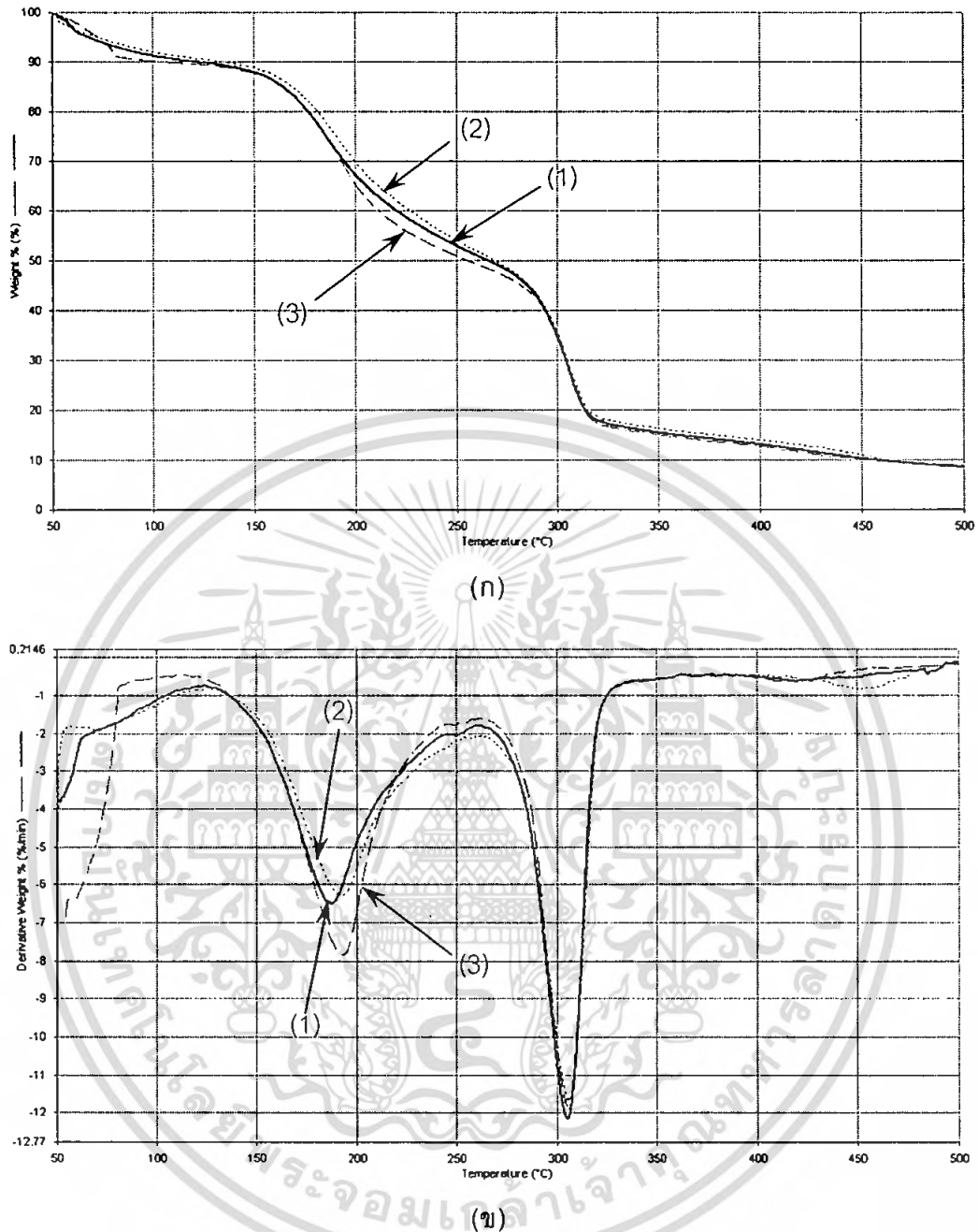
สมบัติด้านความร้อนที่ทำการศึกษ ได้แก่ การศึกษาอุณหภูมิการสลายตัว (Onset Temperature) ของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลด้วยเครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (Thermogravimetric analyzer, TGA) ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ( $N_2$ ) และใช้สภาวะในการทดสอบ คือ อุณหภูมิที่ให้อยู่ในช่วง 50-600 องศาเซลเซียส และมีอัตราการให้ความร้อน (Heating rate) ที่ 10 องศาเซลเซียส/นาที ให้ผลการทดลองดังนี้



(ข)

รูปที่ 4.17 (ก) TGA และ (ข) DTG ของ (1) เทอร์โมพลาสติกสตาบิลจากแป้งข้าวเจ้า (2) เทอร์โมพลาสติกสตาบิลผสมด้วยเส้นใยฝ้าย (3) เทอร์โมพลาสติกสตาบิลผสมด้วยพอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นต่ำ (4) เทอร์โมพลาสติกสตาบิลผสมด้วย เส้นใยฝ้าย : พอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นต่ำ เท่ากับ 1.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 (ก) TGA และ (ข) DTG ของ (1) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้า ผสมด้วยเส้นใยฝ้าย : พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เท่ากับ 1:1 (2) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้า ผสมด้วยเส้นใยฝ้าย : พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เท่ากับ 1:2 (3) เทอร์โมพลาสติกสตาร์ชจากแป้งข้าวเจ้า ผสมด้วยเส้นใยฝ้าย : พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ เท่ากับ 2:1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิการสลายตัวของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชเมื่อผสมด้วยเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำร่วมกัน

เส้นใยฝ้าย : พอลิเอทิลีน ชนิดความหนาแน่นต่ำ	อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัว (°C)			
	ช่วงที่ 1 (แบ่ง)	ช่วงที่ 2 (กลีเซอรอล)	ช่วงที่ 3 (เส้นใยฝ้าย)	ช่วงที่ 4 (พอลิเอทิลีนชนิด ความหนาแน่นต่ำ)
0:0	162.1	292.9	-	-
1:0	167.3	291.3	331.7	-
0:1	162.5	288.3	-	421.2
1:1	163.4	291.2	333.8	420.7
1:2	163.9	289.9	333.2	425.5
2:1	165.4	291.9	333.9	419.7

จากตารางที่ 4.3 พบว่าเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชในสูตรที่มีอัตราส่วนระหว่างเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเป็น 0:0 เกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิ 162.1 และ 292.9 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ซึ่งช่วงอุณหภูมิดังกล่าวเป็นอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของแบ่งข้าวเจ้า [20] และกลีเซอรอลที่ใช้เป็นพลาสติกไฮเซออร์ [21, 22] จากการศึกษาการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชโดยใช้เส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ พบว่า มีผลทำให้อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชสูงขึ้น โดยสูตรที่มีการปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำคิดเป็นอัตราส่วน 1:0 ซึ่งมีเส้นใยฝ้ายผสมอยู่ในปริมาณ 5% โดยน้ำหนัก ทำให้อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชเพิ่มขึ้นมากที่สุด มีค่าเป็น 167.3 องศาเซลเซียส โดยพบอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของเส้นใยฝ้ายอยู่ที่ 331.7 องศาเซลเซียส สำหรับเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชในสูตรที่มีการปรับปรุงด้วยเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำคิดเป็นอัตราส่วน 0:1 ซึ่งมีพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำผสมอยู่ในปริมาณ 5% โดยน้ำหนัก ทำให้อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชเพิ่มขึ้นเป็น 162.5 องศาเซลเซียส โดยพบอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำอยู่ที่ 421.2 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษาผลของการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลโดยใช้เส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำร่วมกัน ในอัตราส่วนของเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ คิดเป็น 1:1, 1:2 และ 2:1 พบว่าสูตรที่มีอัตราส่วนของเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำคิดเป็น 1:1 แสดงอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวที่ 333.8 และ 420.7 องศาเซลเซียส สูตรอัตราส่วน 1:2 แสดงอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวที่ 333.2 และ 425.5 องศาเซลเซียส และสูตรอัตราส่วน 2: 1 แสดงอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวที่ 333.9 และ 419.7 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถยืนยันได้ว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรลที่เตรียมได้มีทั้งเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำเป็นองค์ประกอบ โดยสูตรอัตราส่วน 2:1 ที่มีเส้นใยฝ้ายอยู่ในปริมาณมากกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ มีผลทำให้เทอร์โมพลาสติกสตาโรลมีอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวสูงขึ้นเป็น 165.4 องศาเซลเซียส ส่วนสูตรที่คิดเป็นอัตราส่วน 1:2 ที่มีพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำอยู่ในปริมาณที่มากกว่าเส้นใยฝ้าย ส่งผลให้เทอร์โมพลาสติกสตาโรลมีอุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวสูงขึ้นเป็น 163.9 องศาเซลเซียส จะเห็นได้ว่าการปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยฝ้ายมีผลทำให้อุณหภูมิเริ่มต้นการสลายตัวของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลสูงขึ้นได้มากกว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

1. จากการศึกษาผลของอุณหภูมิและความเร็วรอบที่เหมาะสมในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวเจ้า โดยทำการผสมด้วยเครื่องผสมระบบปิดที่ความเร็วรอบ 40 และ 100 รอบ/นาที ที่อุณหภูมิ 170 180 และ 190 องศาเซลเซียส พบว่าภาวะการผสมที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วรอบ 40 รอบ/นาที ทำให้ได้เทอร์โมพลาสติกสตาโรซที่มีสมบัติเชิงกลดีที่สุด
2. จากการศึกษาการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวเจ้าโดยใช้เส้นใยฝ้ายเป็นส่วนเสริมแรงในปริมาณ 3% 5% 7% และ 10 % โดยน้ำหนัก พบว่าที่ปริมาณเส้นใยฝ้าย 5% ให้สมบัติเชิงกลสูงที่สุด และสมบัติเชิงกลเริ่มมีแนวโน้มลดลงเมื่อผสมเส้นใยฝ้ายในปริมาณ 7% โดยน้ำหนัก
3. จากการศึกษาการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวเจ้าโดยใช้พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในปริมาณ 5% 10% และ 15 % โดยน้ำหนัก พบว่าพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ปริมาณ 5% ให้สมบัติเชิงกลที่ยอมรับได้
4. จากการศึกษาการปรับปรุงสมบัติของเทอร์โมพลาสติกสตาโรซจากแป้งข้าวเจ้าโดยใช้เส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำคิดเป็นอัตราส่วน 1:1 1:2 และ 2:1 พบว่าเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมีส่วนช่วยให้เทอร์โมพลาสติกสตาโรซสามารถรับแรงได้มากขึ้น และมีความยืดหยุ่นดีขึ้น โดยให้สมบัติเชิงกลสูงที่สุดเมื่อทำการปรับปรุงสมบัติด้วยอัตราส่วน 2:1
5. จากการศึกษาสมบัติด้านการดูดซับน้ำพบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาโรซในสูตรที่มีเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำคิดเป็นอัตราส่วน 1:0 มีความสามารถในการดูดซับน้ำมากที่สุด และสูตรที่มีอัตราส่วนระหว่างเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ คิดเป็น 0:1 มีการดูดซับน้ำต่ำที่สุด เนื่องมาจากความแตกต่างกันของเส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. จากการศึกษาสมบัติด้านการย่อยสลายด้วยการฝังดิน พบว่าเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิตี้ที่ไม่มีการปรับปรุงสมบัติ มีแนวโน้มในการย่อยสลายมากที่สุด ส่วนเทอร์โมพลาสติกสตาบิลิตี้ที่มีการปรับปรุงสมบัติด้วยเส้นใยฝ้ายต่อพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำในอัตราส่วน 0:1 ใช้ระยะเวลาในการย่อยสลายนานที่สุด

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. การผสมพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำให้เกิดการกระจายตัวที่ดีขึ้น ควรเติมสารช่วยผสม (Compatibiliser) ซึ่งทำหน้าที่เสมือนสะพานเชื่อมวัฏภาคของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำซึ่งไม่มีขั้วให้เข้ากับเมทริกซ์ของแป้งข้าวเจ้าซึ่งมีขั้วได้ดีขึ้น จึงเกิดการกระจายตัวของวัฏภาคของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำมากขึ้นด้วย ทั้งนี้สารช่วยผสมที่นิยมใช้มักเป็นพวกพอลิเมอร์ผสมที่มีโครงสร้างแบบไดบล็อก ไตรบล็อก แบบกึ่ง และแบบสุ่ม และการเข้ากันได้ที่ดีขึ้นจะส่งผลต่อการขึ้นรูปด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบอัด (Compression molding) โดยจะได้ชิ้นงานที่มีรอยแยกของวัฏภาคน้อยลงด้วย
2. ศึกษาผลของพลาสติกไซเซอร์ โดยเลือกใช้พลาสติกไซเซอร์ต่างชนิดกัน เช่น พอลิเอทิลีนไกลคอล ซอร์บิทอล เป็นต้น
3. ศึกษาเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่าง ๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] <http://www.oae.go.th/OAE-WAB-SITE/profile/commodityPro>
- [2] กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. 2546. เทคโนโลยีของแป้ง. พิมพ์ครั้งที่ 3. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- [3] อรุณา สรวารี. 2546 .สารเติมแต่งพอลิเมอร์เล่ม 1.ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [4] มณฑา จันทร์เกตุเล็กด. วิทยาศาสตร์สิ่งทอเบื้องต้น. ภาควิชาคหกรรมศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒประสานมิตร
- [5] วรวิทย์ โพนนิกร, " ผลของแป้งชนิดต่าง ๆ ที่มีต่อการเสื่อมสภาพของพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงในสภาวะฝึ้งกลบ", วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2546.
- [6] กิตติวุฒิ ธีรรัตน์พัฒนกิจ, พชร เทียมธำราและราชวัลลภ แจ่มมงคล, "การศึกษาพลาสติกย่อยสลายได้เพื่อใช้ในการฉีดขึ้นรูป", โครงการงานพิเศษวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547.
- [7] กนิษฐา อังกูร์ชต์. "การศึกษาสมบัติของพอลิพรอพิลีนโดยใช้ขี้เลื่อยจากไม้เต็งนอกเป็นสารเสริมแรง", วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2546.
- [8] กาญจณา อุทัยฉาย, โกสิน หาชะวี, นเรนทร์ อาศัยพานิชย์, นัฐพร สุรพัฒน์, วันชัย เลิศวิจิตรจรัส และ อำนาจ สิทธิัตตระกุล, "การเตรียมและการทดสอบคุณสมบัติของเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้ง", 31<sup>st</sup> Congress on Science and Technology of Thailand, Suranaree University of Technology Technology, Silpakorn University, Nakorn Pathom, 2005.
- [9] U. Funke, W. Bergthaller and M.G. Lindhauer, "Processing and characterization of biodegradable products based on starch", Polymer Degradation and Stability, 59 (1998) 293-296.
- [10] M.B. Fernanda, T.H.S Costa and D.L. Carvalho, "Polypropylene - Wood Fiber Composites : Effect of Treatment and Mixing Conditions on Mechanical Properties", Journal of Applied Polymer Science, 65 (1997) 1227-1235.
- [11] A.A.S. Curvelo, A.J.F. de Carvalho and J.A.M. Agnelli, "Thermoplastic starch-cellulosic fibers composites: preliminary results", Carbohydrate Polymers, 45 (2001) 183-188.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] L. Averous, C. Fringant and L. Moro, "Plasticized starch-cellulose interaction in polysaccharide composites", *Polymers*, 42 (2001) 6565-6572.
- [13] H. D. Rozman, B. K. Kon, A. Abusamah, R. N. Kumar and M. Z. A. Ishak, "Rubberwood – High-Density Polyethylene Composite : Effect of Filler Size and Coupling Agents on Mechanical Properties", *Journal of Applied Polymer Science*, 69 (1998) 1993-2004.
- [14] X. Ma, J. Yu and J. F. Kennedy, "Studies on the properties of natural fibers-reinforced thermoplastic starch composites", *Carbohydrate Polymers*, 62 (2005) 19-24.
- [15] A.L. Da ROz, A.J.F. Carvalho, A. Gandind and A.A.S. Curvelo, "The effect of plasticizers on thermoplastic starch compositions obtained by melt processing", *Carbohydrate Polymers*, 63 (2006) 417-424.
- [16] M. Thuwall, A. Boldizar and M. Rigdahl, "Extrusion processing of high amylase potato starch materials", *Carbohydrate Polymers*, 65 (2006) 441-446.
- [17] R. Shi and Q. Liu, T. Ding, Y. Han, L. Zhang, D. Chan and W. Tian, "Ageing of Soft Thermoplastic Starch with High Glycerol Content", *Journal of Applied Polymer Science*, 103 (2007) 574-586.
- [18] ASTM D 638, "Standard Test Methods for Tensile Properties of Plastic", Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1992.
- [19] R.Chandra and R.Rustgi, "Biodegradable polymers", *Progress in Polymer Science*, 23 (1998) 1273-1335.
- [20] <http://www.jtbaker.com/msds/englishhtml/G4774.htm>
- [21] <http://www.answer.com/topic/glycerol>
- [22] <http://fscimage.fishersci.com/msds/10440.htm>



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก

ตารางแสดงลักษณะของชิ้นงานที่ได้จากอัตราส่วนแป้งข้าวเจ้าและกลีเซอรอล  
ที่ปริมาณต่างๆ ขึ้นรูปด้วยการอัดรีด

แป้งข้าวเจ้า (phr)	กลีเซอรอล (phr)	ลักษณะทางกายภาพ
100	50	ชิ้นงานมีลักษณะแตกปน ไม่สามารถหีบจับได้
100	75	ชิ้นงานมีความเหนียวมากขึ้น แต่ไม่เป็นแผ่นที่ต่อเนื่องกัน
100	100	ชิ้นงานมีความเหนียวคล้ายยางมากขึ้น สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นที่ต่อเนื่องกันได้
100	120	ชิ้นงานมีความอ่อนนิ่มมาก
100	140	ชิ้นงานไม่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นได้
100	160	ชิ้นงานไม่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ภาคผนวก ข**  
**ตารางแสดงสมบัติเชิงกลของเทอร์โมพลาสติกสตาโรลจากแป้งข้าวเจ้า โดยใช้**  
**เส้นใยฝ้ายและพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ**  
**แรงดึง**

ชนิดทดสอบ	Load (N)
Pure เทอร์โมพลาสติกสตาโรล 170 °C/40 rpm	3.51±0.11
Pure เทอร์โมพลาสติกสตาโรล 170 °C/100 rpm	3.28±0.42
Pure เทอร์โมพลาสติกสตาโรล 180 °C/40 rpm	3.23±0.48
Pure เทอร์โมพลาสติกสตาโรล 180 °C/100 rpm	3.04±0.36
Pure เทอร์โมพลาสติกสตาโรล 190 °C/40 rpm	2.37±0.30
Pure เทอร์โมพลาสติกสตาโรล 190 °C/100 rpm	1.95±0.30
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล+เส้นใยฝ้าย 3%	12.28±1.76
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล+เส้นใยฝ้าย 5%	13.43±3.24
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล+เส้นใยฝ้าย 7%	12.85±1.84
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล+เส้นใยฝ้าย 10%	12.14±2.68
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล+LDPE 5%	4.77±0.31
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล+LDPE 10%	10.47±0.51
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล+LDPE 15%	11.20±0.91
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล+1:1 เส้นใยฝ้าย:LDPE	6.62±1.49
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล+1:2 เส้นใยฝ้าย:LDPE	7.74±1.72
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล+2:1 เส้นใยฝ้าย:LDPE	13.85±3.07

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความแข็งแรงดึง

ชนิดทดสอบ	Tensile Strength (MPa)
Pure เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช 170 °C/40 rpm	0.23±0.01
Pure เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช 170 °C/100 rpm	0.20±0.02
Pure เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช 180 °C/40 rpm	0.21±0.02
Pure เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช 180 °C/100 rpm	0.18±0.04
Pure เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช 190 °C/40 rpm	0.12±0.02
Pure เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช 190 °C/100 rpm	0.15±0.22
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+เส้นใยฝ้าย 3%	0.87±0.24
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+เส้นใยฝ้าย 5%	0.96±0.29
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+เส้นใยฝ้าย 7%	0.77±0.27
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+เส้นใยฝ้าย 10%	0.56±0.23
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+LDPE 5%	0.46±0.04
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+LDPE 10%	0.78±0.05
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+LDPE 15%	0.92±0.09
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+1:1 เส้นใยฝ้าย:LDPE	0.51±0.12
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+1:2 เส้นใยฝ้าย:LDPE	0.56±0.12
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+2:1 เส้นใยฝ้าย:LDPE	0.85±0.34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การดึงยึด

ชนิดทดสอบ	Elongation (mm)
Pure เทอร์โมพลาสติกสตาโรล 170 °C/40 rpm	6.06±0.27
Pure เทอร์โมพลาสติกสตาโรล 170 °C/100 rpm	9.82±1.96
Pure เทอร์โมพลาสติกสตาโรล 180 °C/40 rpm	8.71±2.02
Pure เทอร์โมพลาสติกสตาโรล 180 °C/100 rpm	10.86±1.38
Pure เทอร์โมพลาสติกสตาโรล 190 °C/40 rpm	9.88±1.59
Pure เทอร์โมพลาสติกสตาโรล 190 °C/100 rpm	14.51±2.09
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล+เส้นใยฝ้าย 3%	4.37±0.58
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล+เส้นใยฝ้าย 5%	4.53±0.99
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล+เส้นใยฝ้าย 7%	3.63±0.57
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล+เส้นใยฝ้าย 10%	2.89±0.15
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล+LDPE 5%	12.42±0.93
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล+LDPE 10%	9.57±1.25
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล+LDPE 15%	8.21±0.88
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล+1:1 เส้นใยฝ้าย:LDPE	8.15±2.13
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล+1:2 เส้นใยฝ้าย:LDPE	9.87±2.64
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล+2:1 เส้นใยฝ้าย:LDPE	6.52±1.60

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เปอร์เซ็นต์การดึงยืด ณ จุดขาด

ชนิดทดสอบ	Strain at break (%)
Pure เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช 170 °C/40 rpm	24.25±1.09
Pure เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช 170 °C/100 rpm	42.28±6.21
Pure เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช 180 °C/40 rpm	35.15±8.33
Pure เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช 180 °C/100 rpm	41.89±4.78
Pure เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช 190 °C/40 rpm	37.49±3.68
Pure เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช 190 °C/100 rpm	54.15±9.47
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+เส้นใยฝ้าย 3%	17.36±2.10
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+เส้นใยฝ้าย 5%	15.73±1.69
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+เส้นใยฝ้าย 7%	13.41±1.92
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+เส้นใยฝ้าย 10%	11.54±0.65
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+LDPE 5%	44.08±4.96
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+LDPE 10%	39.03±4.73
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+LDPE 15%	32.54±2.70
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+1:1 เส้นใยฝ้าย:LDPE	35.45±6.65
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+1:2 เส้นใยฝ้าย:LDPE	42.26±7.57
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+2:1 เส้นใยฝ้าย:LDPE	27.64±4.96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## มอดุลัส

ชนิดทดสอบ	Young 's modulus (MPa)
Pure เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช 170 °C/40 rpm	1.13±0.18
Pure เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช 170 °C/100 rpm	0.84±0.12
Pure เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช 180 °C/40 rpm	1.12±0.13
Pure เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช 180 °C/100 rpm	0.83±0.14
Pure เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช 190 °C/40 rpm	0.57±0.11
Pure เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช 190 °C/100 rpm	0.52±0.12
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+เส้นใยฝ้าย 3%	2.93±1.15
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+เส้นใยฝ้าย 5%	4.73±1.30
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+เส้นใยฝ้าย 7%	4.19±0.59
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+เส้นใยฝ้าย 10%	3.81±1.07
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+LDPE 5%	1.17±0.09
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+LDPE 10%	1.84±0.20
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+LDPE 15%	2.00±0.23
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+1:1 เส้นใยฝ้าย:LDPE	1.33±0.37
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+1:2 เส้นใยฝ้าย:LDPE	1.20±0.23
เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช+2:1 เส้นใยฝ้าย:LDPE	2.18±0.96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความแข็งกด

ชนิดทดสอบ	Hardness (Shore A)
Pure เทอร์โมพลาสติกสตาโรล 170 °C/40 rpm	14.30±0.50
Pure เทอร์โมพลาสติกสตาโรล 170 °C/100 rpm	12.40±0.38
Pure เทอร์โมพลาสติกสตาโรล 180 °C/40 rpm	12.80±0.42
Pure เทอร์โมพลาสติกสตาโรล 180 °C/100 rpm	11.40±0.40
Pure เทอร์โมพลาสติกสตาโรล 190 °C/40 rpm	12.40±0.30
Pure เทอร์โมพลาสติกสตาโรล 190 °C/100 rpm	6.50±0.62
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล+เส้นใยฝ้าย 3%	28.00±5.50
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล+เส้นใยฝ้าย 5%	34.40±3.89
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล+เส้นใยฝ้าย 7%	41.40±4.45
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล+เส้นใยฝ้าย 10%	47.20±3.96
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล+LDPE 5%	25.90±1.66
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล+LDPE 10%	41.80±2.39
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล+LDPE 15%	45.00±2.45
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล+1:1 เส้นใยฝ้าย:LDPE	31.11±3.98
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล+1:2 เส้นใยฝ้าย:LDPE	36.90±4.38
เทอร์โมพลาสติกสตาโรล+2:1 เส้นใยฝ้าย:LDPE	45.70±3.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค  
ตารางน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงเมื่อทดสอบด้วยการฝังดิน

วันที่	น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง (กรัม)					
	เส้นใยฝ้าย : พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ					
	0:0	1:0	0:1	1:1	1:2	2:1
1	2.97	1.38	1.44	3.80	3.25	2.00
2	1.28	3.20	1.10	4.41	2.97	2.93
3	5.74	4.96	2.20	6.28	4.26	7.76
4	5.40	4.86	2.42	4.93	6.25	7.03
5	8.85	5.99	5.77	7.38	6.69	8.96

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง  
การควบคุมความชื้นในดิน

$$\% \text{ความชื้นในดิน} = \frac{\text{น้ำหนักดินก่อนอบ (g)} - \text{น้ำหนักดินหลังอบ (g)}}{\text{น้ำหนักดินก่อนอบ (g)}} \times 100$$

เมื่อต้องการควบคุมความชื้นในดินให้อยู่ที่ 20%

$$\text{ปริมาณน้ำที่ 20 \% (g)} = \frac{20\% \times (\text{น้ำหนักดินก่อนอบ (g)} - \text{น้ำหนักดินหลังอบ (g)})}{\% \text{ความชื้นในดิน}}$$

$$\text{ปริมาณที่ต้องเติมเพิ่มในดิน} = \text{ปริมาณน้ำที่ 20 \% (g)} - (\text{น้ำหนักดินก่อนอบ} - \text{น้ำหนักดินหลังอบ})(g)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้